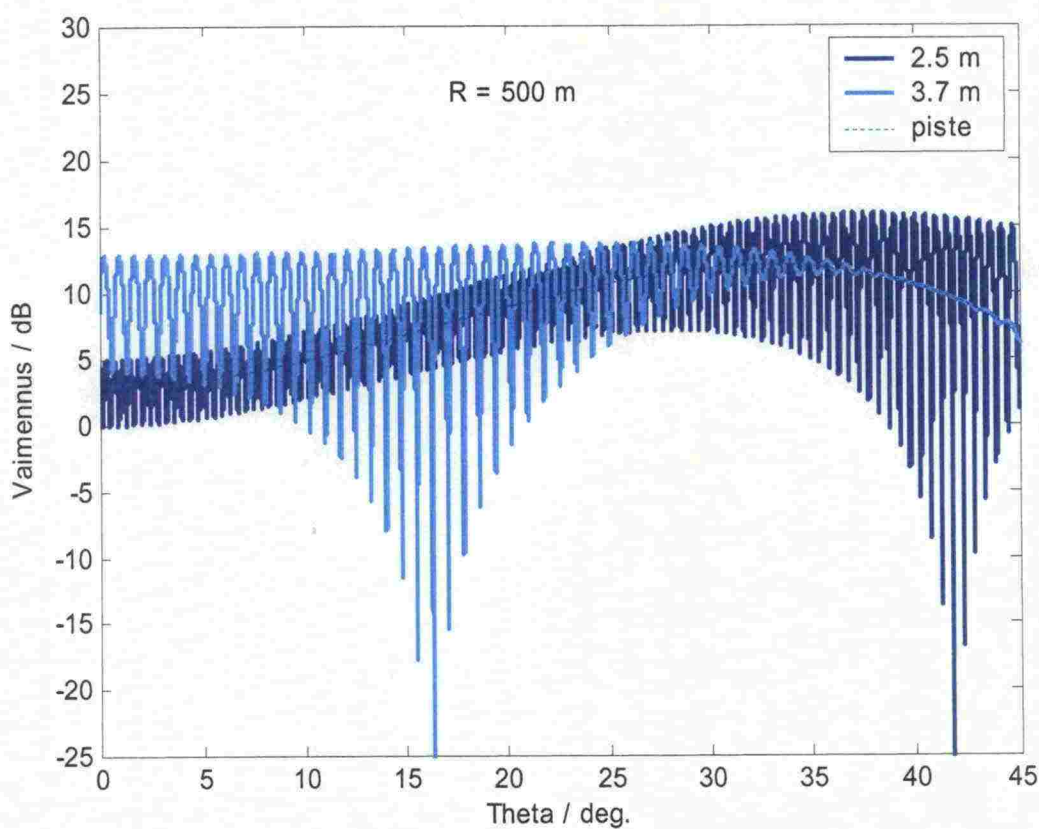


VIITOISSA KÄYTETTÄVÄT TUTKAHEIJASTIMET

Projektin vaiheet II ja III



Helsinki 2005

ISSN 1456 - 9442

Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri)	Julkaisun laji
VTT Tietotekniikka	Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja 4/2005
W. Backman, A. Hujanen, S. Horsmanheimo	Toimeksiantaja
	Merenkulkulaitos, R. Joro / Viittatehdas J-P Ollaranta
Tutkimus tutkasoppien tutkapoikkipinta-alasta	Toimielimen asettamispäivämäärä
	11.01.2005
Julkaisun nimi	
VIITOISSA KÄYTETTÄVÄT TUTKAHEIJASTIMET, Projektin vaiheet II ja III.	

Tiivistelmä

Tässä raportissa esitetään VTT Tietotekniikalta tilatun tutkaheijastimien analysointiprojektin II ja III -vaiheen tulokset. Projektissa tutkittiin Merenkulkulaitoksen viittatehtaan kehittämien tutkaheijastimien ominaisuuksia VTT:llä kehitetyllä CAST -laskentaohjelmistolla. Ohjelmisto on toteutettu ensisijaisesti laivamallien tutkapoikkipinnan (RCS, radar cross section) laskentaan, mutta sitä voidaan suoraan hyödyntää myös muiden kolmiulotteisten kohteiden laskennassa. Laskentaohjelmistossa kohdetta valaistiin tasoaallolla, jolle laskettiin kohteen pinnasta tapahtuvat moninkertaiset heijastukset sekä kohteen terävistä särmistä tapahtuva diffraktio. Heijastuksien laskennassa hyödynnettiin VTT:llä kehitettyä APO (Antenna theory applied to Physical Optics) -menetelmää ja diffraktion laskennassa PTD (Physical Theory of Diffraction) -menetelmää. APO-menetelmässä kohteen pinnalla tutka-aallolle tapahtuvat moninkertaiset heijastukset huomioitiin geometrisen optiikan avulla.

Projektin I -vaihe tuotti tuloksena käytettyjen 8 eri tyyppisen tutkasoppimallin lasketut tutkapoikkipinta-alat suoraan valaisukulmaa vastaan, 15° kallistettuna valaisusuuntaa vastaan ja sama valaisusuunasta pois päin. Laskennassa simuloitiin myös vedenpinnan aikaansaama monitie-eteneminen lopputuloksiin. Projektin II -vaiheessa VTT:n kehittämästä tutkasoppigeometriasta toteutettiin kolmiulotteiset CAD-mallit. Ensisijaisena tavoitteena oli kehittää vain yksi, kaikissa viittakokoluokissa käytettävä soppigeometria, jota voisi yksinkertaisesti skaalata muihin kokoluokkiin ja näin saada kustannustehokkuutta valmistukseen, tuotevarastointiin kuin myös keventää lopputuotteen paino samalla optimoiden viitan painopistettä kellunta-akselinsa suhteen. Yhden geometrian ratkaisu osoittautui monimutkaiseksi, koska pienempien viittojen halkaisija on hyvin pieni ja näiden RCS -arvon kasvattaminen yhdellä sopella monimutkainen tehtävä. Samoin isoimpiin kokoluokkiin jätettävä pariston asennusaukko keskelle soppirakennetta toi lisäpohdittavaa. Projektin tässä vaiheessa kehitettiin myös tilastolliset tunnusluvut viitan asennon vaikutuksista lopputulokseen. Tutkimuksessa huomioitiin myös yksittäiset huippu ja miinusarvot siten, että tulokset keskiarvoistettiin kallistumavälille $40 - 140^\circ$ matriisilaskennan kaavoja hyväksikäyttäen. Lopuksi kehitettiin kaava, lopputuloksen rakentuessa näinkin monen asian funktiona, kokonaisvertailua varten, joka huomioi huiput, keskiarvot ja keskihajonnat kalistuskulmien funktiona. Vertailtaessa sirontarastereita I ja II -vaiheen välillä, on huomioitava, että I -vaiheen tulokset samasta keilaussuunnasta antavat suuremman tuloksen kuin II -vaiheessa. Tämä johtuu siitä, että I -vaiheessa tulokset on laskettu merenpinnan tuoman minitie-etenemisen aikaansaaman lisän mittauskulmien tapauksessa. II -vaihe huomioi kaikki kulmat sekä suunnat ja tässä vaiheet vastaanottimella simuloitu tasoaaltorintaman vaihe-eroista. Yksiselitteisesti yksikerrossoppi antaa kaikissa tapauksissa tasaisimman vasteen kun taas monikerrossopet (kolmi- ja nelikerros) aiheuttavat sirontakuvion liuskostumista.

Projektin III -vaiheessa hyödynnettiin II -vaiheessa kehitetyt kaavat ja laskentamallit sekä asetettiin tavoitteeksi kehittää soppimallit isoille, paristoputkisille malleille. Tässä kehitys vei yksikerrossoppigeometriaan, joita sijoitettaisiin kaksi päällekkäin tietyllä etäisyydellä viittaan. Kehitetty ratkaisu lisäsi kaikissa kehitetyissä kokoluokissa tutkapoikkipinta-alaa yli 3 dB, joka tarkoittaa logaritmisesta kaavasta laskettuna tutkapoikkipinta-alan kaksinkertaistumista. Simuloinnissa laskettiin myös lopuksi lukuisia vaihtoehtoja soppien korkeuksista ja niiden välisistä etäisyyksistä. Näistä laskettiin, tutkan polarisaation ollessa pystypolarisaatio (kuten merenkulikututkissa on), tutkavasteen minimi ja maksimi etäisyyden ja kallistuskulmien funktiona. Saaduilla tuloksilla kehitettiin yksiselitteinen kaava tutkasoppien välisestä etäisyydestä viitan sisällä toisiinsa nähden. Kehitettyjen tutkasoppien sekä optimoitujen soppien välisten etäisyyksien avulla RCS -arvo saadaan kasvamaan reilusti yli 3 dB vanhoihin malleihin nähden. Lisäksi nyt voidaan väyläsuunnittelun avuksi johtaa kaava, jolla voidaan määrittää tutkamerkkien ja viittojen ensimmäinen RCS -minimikohta + muut minimi ja maksimit.

Avainsanat (asiasanat) Tutkapoikkipinta-ala, fysikaalinen ja geometrinen optiikka, diffraktio sähkömagneettinen tasoaalto, sironta.			
Muut tiedot			
Sarjan nimi ja numero Merenkululaitoksen julkaisuja 08 / 2004		ISSN 1456 - 9442	ISBN
Kokonaissivumäärä 2 + 52 + 30	Kieli Suomi	Hinta	Luottamuksellisuus Sisäiseen käyttöön
Jakaja		Kustantaja	

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	i
Sisällysluettelo.....	ii
1 Johdanto	1
2 Laskentatapa.....	1
3 Tutkaheijastinmallit.....	2
3.1 Viitoissa käytössä olevat tutkaheijastinmallit	2
3.2 Referenssimallit.....	4
4 Sirontarasterit	5
4.1 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9).....	5
4.2 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)	8
4.3 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)	10
4.4 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)	12
4.5 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)	14
5 Tehotasojen vaihtelujen vertailu.....	16
5.1 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9).....	17
5.2 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)	18
5.3 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)	19
5.4 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)	21
5.5 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)	21
6 Tarkasteluvälin rajausta ja sironta-arvojen keskiarvoistaminen.....	23
6.1 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9).....	24
6.2 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)	26
6.3 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)	27
6.4 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)	28
6.5 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)	29
7 Tutkaheijastimen asennon huomiointi.....	30
7.1 Todennäköisyysfunktio	30
7.2 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9).....	31
7.3 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)	32
7.4 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)	34
7.5 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)	35
7.6 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)	36
8 Tilastollisten tunnuslukujen määrittely	37
8.1 Keskiarvo, keskihajonta ja maksimi.....	37
8.2 Tilastollisten tunnuslukujen yhdistäminen.....	39
9 Yhteenveto	41
9.1 Sirontarasteiden analysointi	Virhe. Kirjanmerk
Lähdeluettelo	43
Liite A: Normalisoidut tunnusluvut.....	44

Liite B: Venytetty TH140-malli	46
Liite C: Referenssilaskennat.....	51

1 Johdanto

Tämä tutkimus on jatkoa VTT Tietotekniikan Merenkululaitokselle tekemälle tutkaheijastinten analysointihankkeelle, jossa selvitettiin käytössä olevien tutkaheijastinmallien heijastusominaisuuksia S- (3 GHz) ja X- (9 GHz) taajuualueilla. Tutkaheijastimista luotuja laskentamalleja analysoitiin VTT:llä kehitetyllä tutkapoikkipinta-alan laskentaohjelmistolla, CAST:lla [2]. Ohjelmistoa on kehitetty yhdessä Merivoimien Tutkimuslaitoksen kanssa erilaisten kohteiden häiveominaisuuksien analysointiin.

Tämän hankkeen tavoitteena oli toteuttaa referenssimallit eri halkaisijamittaa oleville tutkaheijastinmalleille ja kehittää menetelmä erilaisten tutkaheijastinmallien vertailuun. Tämä tulisi tehdä tilastollisten tunnuslukujen avulla, jotka ottavat huomioon tutkaheijastimen sirontakuvion tasaisuuden, maksimin ja keskimääräisen sirontatason.

2 Laskentatapa

Tutkaheijastinten analysoinnissa käytettiin CAST-ohjelmistoa, jossa laskentakohteena olevaa tutkaheijastinta valaistaan tasoaallolla ja siitä tapahtuneet heijastukset lasketaan VTT:llä kehitetyllä APO-menetelmällä (Antenna theory applied to Physical Optics) [3]. Diffraktiovaikutusta ei huomioitu, koska aikaisemmassa tutkimuksessa [1] oli todettu, että sen vaikutus tutkapoikkipinta-alaan on merkityksetön. Tutkaheijastimien sopet ovat terästä, mikä on laskentaohjelmistossa huomioitu täydellisesti heijastavalla pinnoitemateriaalilla. Tarkastelussa tutkittiin vain monostaattista tapausta, jossa lähetin ja vastaanotin ovat samassa pisteessä. Polarisaatioksi valittiin vaakapolarisaatio, koska aallokon vaikutus siihen on pienempi kuin pystypolarisaatioon. Tutkaheijastinmalleille laskettiin sirontarasteri kaikilla avaruuskulmilla ($\theta = 0..180^\circ$ ja $\phi = 0..360^\circ$). Laskennassa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 1.

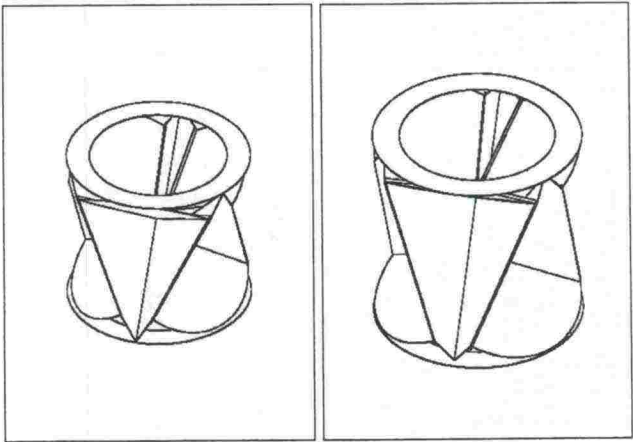
Taulukko 1. Laskennassa käytetyt parametrit.

Parametri	Arvoalue
Taajuus	3 ja 9 GHz
Theta-kulma (kiertää kohteen ylhäältä alas)	Vaakapyyhkäisyssä 90° Pystypyyhkäisyssä 0° - 360° Koko avaruudelle suoritettussa pyyhkäisyssä 0° - 180°
Phi-kulma (kiertää kohteen vastapäivään horisontaalitasossa)	Vaakapyyhkäisyssä 0° - 360° Pystypyyhkäisyssä 0° Koko avaruudelle suoritettussa pyyhkäisyssä 0° - 360°
Polarisaatio	Vaakapolarisaatio
Heijastusten määrä	5

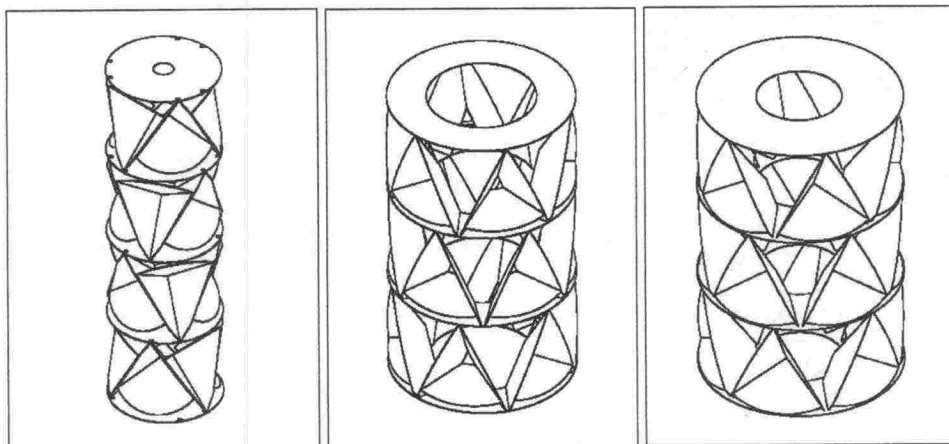
3 Tutkaheijastinmallit

3.1 Viitoissa käytössä olevat tutkaheijastinmallit

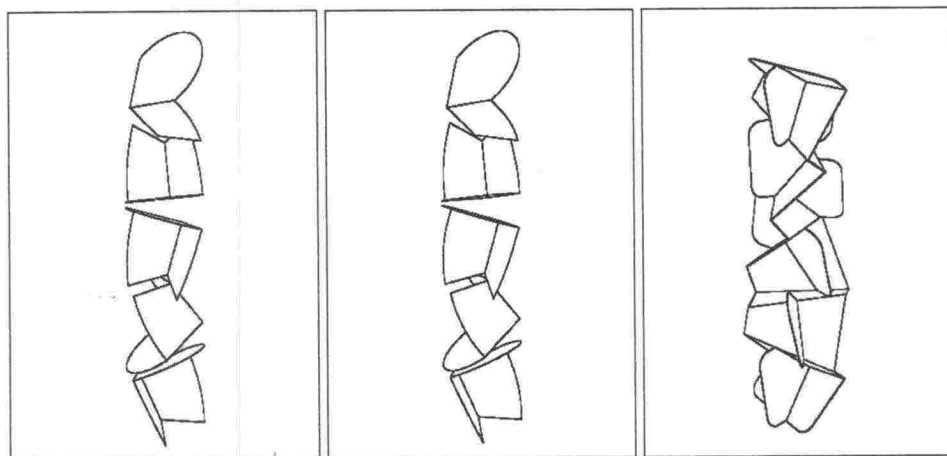
Vertailtavina malleina käytettiin laskennassa Merenkulkulaitoksen toimittamia tutkaheijastinmalleja, jotka on nimetty TH1, TH2, TH3, TH5, TH6, TH7, TH8 ja TH9. Rakenteen perusteella tutkaheijastimet voidaan luokitella seuraavasti: sopet yhdessä kerroksessa (kuvassa 1 TH3 ja TH5), useita soppeja useassa kerroksessa (kuvassa 2 TH1, TH2 ja TH6) ja yksittäiset sopet eri kerroksissa (kuvassa 3 TH7, TH8 ja TH9). Heijastimien mitat ja poikkipinta-alat on esitetty taulukossa 2.



Kuva 1. Sopet samassa kerroksessa. TH3 on vasemmalla ja TH5 oikealla.



Kuva 2. Useita soppeja monessa kerroksessa. TH1 on vasemmalla, TH2 keskellä ja TH6 oikealla.



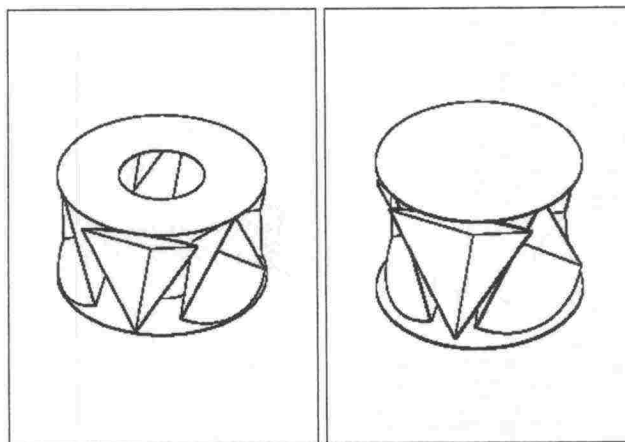
Kuva 3. Yksittäiset sopet eri kerroksissa. TH7 on vasemmalla, TH8 keskellä ja TH9 oikealla.

Taulukko 2. Käytössä olevien tutkaheijastimien mitat ja poikkipinta-alat.

	Halkaisija [cm]	Korkeus [cm]	Poikkipinta-ala [cm ²]
TH1	14	47	658
TH2	32	53	1696
TH3	36	32	1152
TH5	45	45	2025
TH6	45	69	3105
TH7	14	77	1078
TH8	20	113	2260
TH9	14	57	798

3.2 Referenssimallit

Aikaisemmassa tutkimuksessa [1] oli tultu siihen lopputulokseen, että tutkaheijastimet, joissa sopet on aseteltu yhteen kerrokseen, toimivat monikerroksisia malleja paremmin. Sen pohjalta tutkaheijastinmallien vertailuun luotiin viisi eri viittojen halkaisijamitalla olevaa CAD-mallia. Mallien nimet ja halkaisijat ovat TH140 (140 mm), TH200 (200 mm), TH320 (320 mm), TH360 (360 mm) ja TH450 (450 mm). Viimeksi mainittuun malliin on tehty läpivienti paristoputkelle, jonka halkaisija on 184 mm. Kaikissa malleissa sopet on asetettu yhteen kerrokseen kärki vuorotellen ylös- ja alaspäin. Soppeja on referenssimalleissa kuusi ja niiden normaalit on asetettu osoittamaan vaakatasoon. Kuvassa 4 on esitetty kuvat CAD-mallityypeistä, joista referenssimallit on luotu. Referenssimallit TH140, TH200, TH320 ja TH360 on toteutettu skaalaamalla mallia ilman paristoputken läpiviennin. Taulukossa 3 on esitetty referenssimallien fyysiset mitat.



Kuva 4. CAD-mallityypit. Vasemmalla malli paristoputken läpiviennillä ja oikealla ilman.

Taulukko 3. Referenssiheijastimien mitat ja poikkipinta-alat.

	Halkaisija [cm]	Korkeus [cm]	Poikkipinta-ala [cm ²]
TH140	14	10,3	144,2
TH200	20	14,5	290
TH320	32	23	736
TH360	36	26	936
TH450	45	26	1170

4 Sirontarasterit

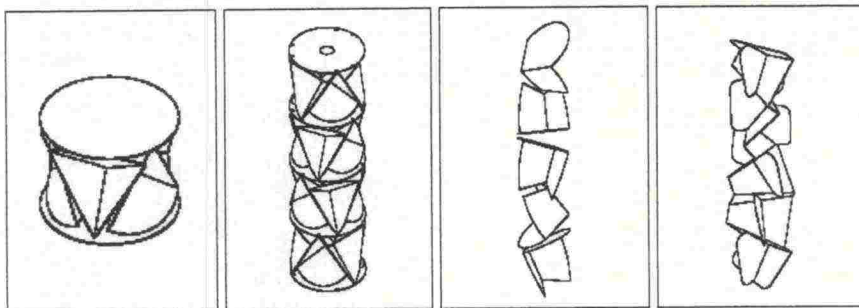
Käytössä olevien tutkaheijastinmallien ja referenssimallien vertailemiseksi laskettiin sirontarasterit kaikille malleille 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla. Laskennassa huomioitiin vain vaakapolarisaatio. Mallit jaettiin viitojen halkaisijakoon perusteella viiteen tarkasteluryhmään ($d = 14$ cm, $d = 20$ cm, $d = 32$ cm, $d = 36$ cm ja $d = 45$ cm), joihin viitataan tarkastelussa roomalaisilla numeroilla I, II, III, IV ja V.

Sirontarastereiden minimi- ja maksimiarvot on asetettu sen tutkaheijastimen mukaan, jolla on suurin maksimiarvo. Minimiarvo on 30 dB maksimiarvoa alhaisempi. Rastereissa rivit edustavat eri θ -avaruuskulmia ja sarakkeet eri ϕ -avaruuskulmia. Theta-kulma kiertää tutkaheijastinta ylhäältä alas. Suunta suoraan ylhäältä on 0° , vaakatasosta 90° ja alhaalta 180° . Phi-kulma on määritelty $0^\circ - 360^\circ$ ja sen kiertosuunta on vastapäivään.

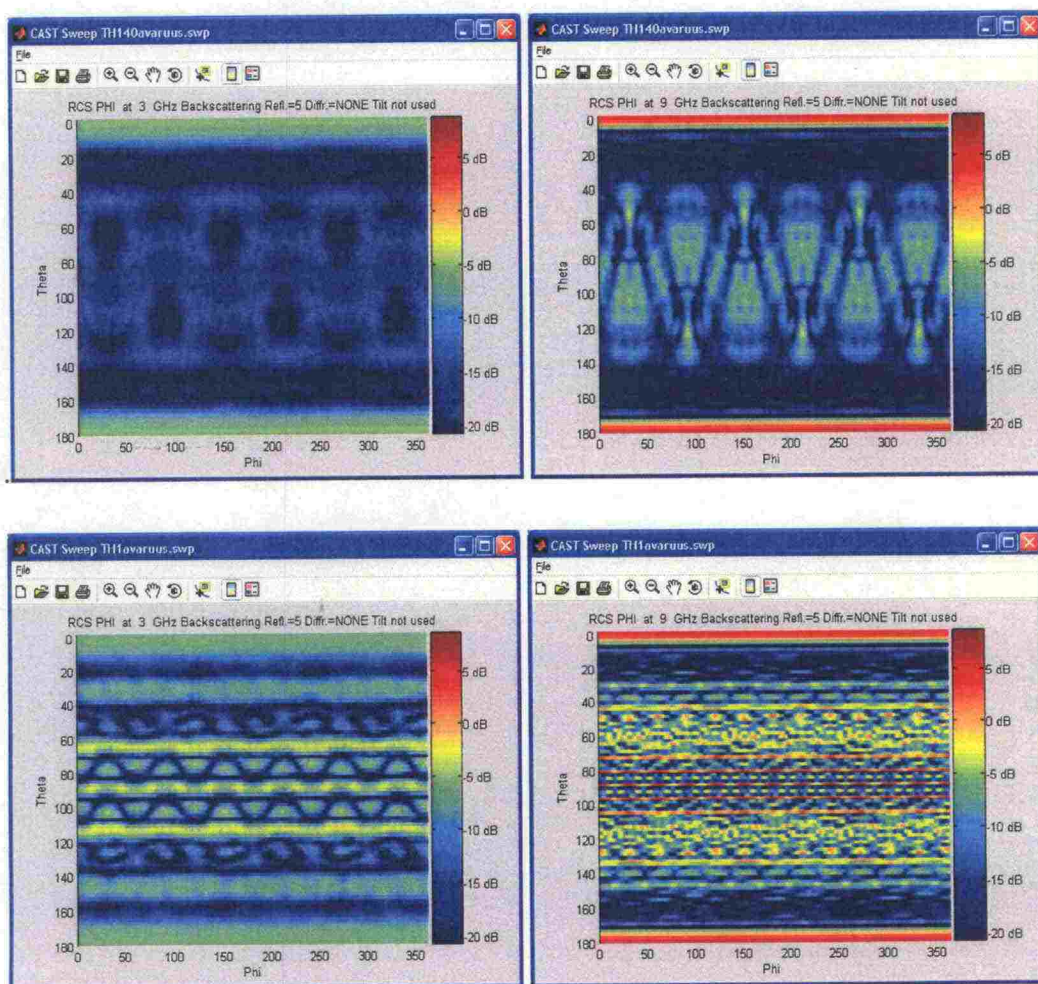
Tarkastelussa kiinnitetään erityisesti huomiota lähellä suuntaa 90° oleviin arvoihin, koska on todennäköisempää, että tutka-aallot osuvat tutkaheijastimeen lähellä vaakatasoa. Tutkaheijastimen poikkipinta-ala vaikuttaa merkittävästi tutkapoikkipinta-arvoon, joten tuloksia vertaillaan myös normalisoituna vastaavan metallilevyn tutkapoikkipinta-alalla.

4.1 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9)

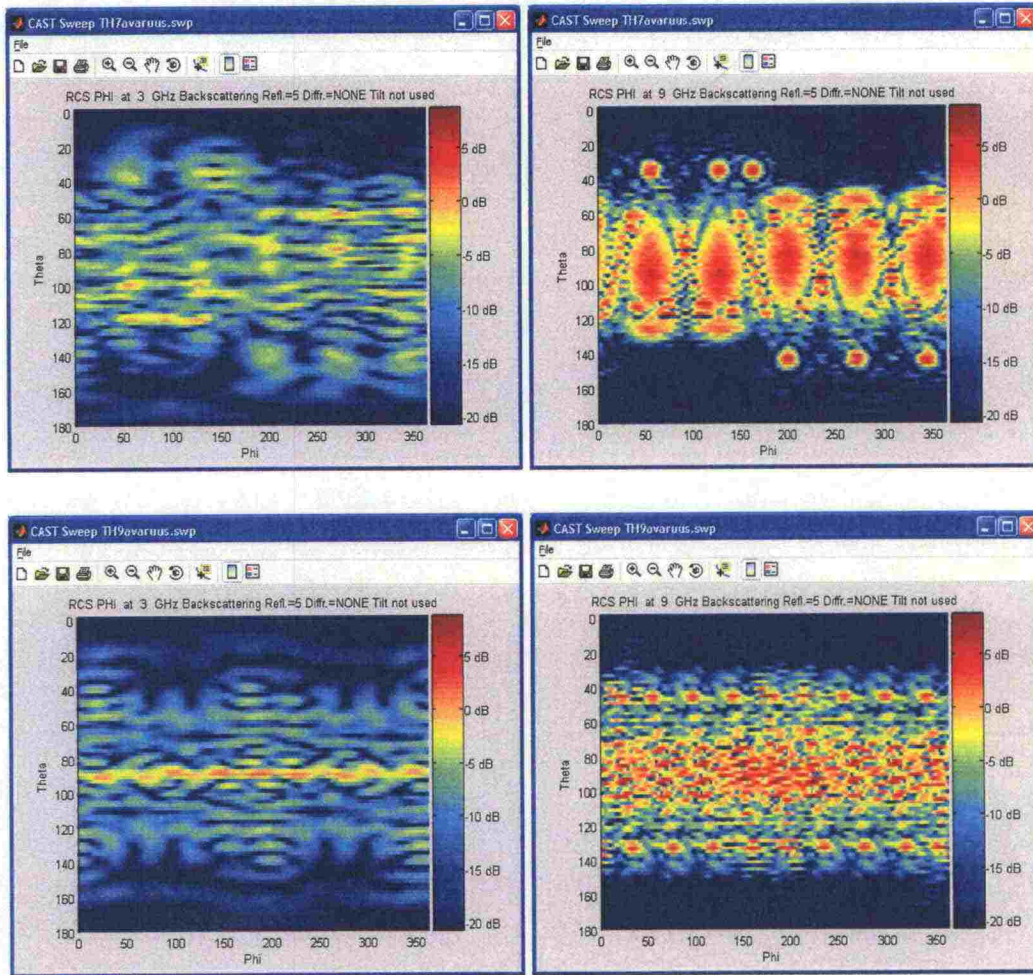
Ensimmäiseen tarkasteluryhmään kuuluvat referenssimalli TH140 ja käytössä olevat mallit TH1, TH7 ja TH9. Mallit poikkeavat suuresti toisistaan. TH140:ssa ovat kaikki sopet samassa kerroksessa, kun taas TH1:ssä on useita soppeja monessa kerroksessa ja TH7:ssä ja TH9:ssä yksi soppi per kerros. Malleissa TH1 ja TH140 soppien kärjet osoittavat vuorotellen ylös- ja alaspäin. TH7:ssä ja TH9:ssä sopet kiertyvät heijastimen keskiakselin ympäri. Kuvassa 5 on esitetty CAD-mallit tutkaheijastimista ja sirontarasterit kuvissa 6 ja 7.



Kuva 5. CAD-mallit tutkaheijastimista, joiden halkaisijat ovat 14 cm. Mallit vasemmalta oikealle TH140, TH1, TH7 ja TH9.



Kuva 6. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH140 ja TH1. Vasemmalta ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella Raja-arvot ovat 9,0 dB ja -21,0 dB.



Kuva 7. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH7 ja TH9. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksilla. Raja-arvot ovat 9,0 dB ja -21,0 dB.

Sirontarastereista nähdään, että referenssimalli TH140:lla on matalin sirontataso molemmilla taajuuksilla. Tämä johtuu siitä, että sen poikkipinta-ala on selvästi muita pienempi. Käytettävä pystykulma-alue on kaikissa tapauksissa likimain $40^\circ - 140^\circ$. Malleilla TH140 ja TH1 saadaan suuret sironta-arvot ylä- ja alasuuntaan. Tämä syntyy takaisinsironnasta soppien päälle ja alle asennetuista pyöreistä tasolevyistä. Rastereista nähdään myös se, että useamman soppikerroksen tapauksessa säteilykuvio liuskoittuu. Tämä näkyy hyvin TH1:n rasterissa molemmilla taajuuksilla. 3 GHz:n taajuuksilla TH1:n rasterissa näkyy laajoja heikkoja alueita, jotka ovat 9 GHz:n taajuuksilla hävinneet nopeamman sirontatasovaihtelun tuloksena.

TH7:n sirontarasterissa näkyy heikkoja alueita 3 GHz:n taajuuksilla, mutta sirontataso säilyy varsin tasaisena kaikilla pystykulmilla. Käyttöalue on kaventunut välille $35^\circ - 135^\circ$. Tämä johtune soppien kiertymisestä tutkaheijastinmallin keskiakselin ympäri. 9 GHz:n taajuuksilla kierron vaikutus näkyy selvemmin. Sirontarasterin maksimikohdat löytyvät soppien keskeltä läheltä vaakatasoa. Tasovaihtelut kasvavat voimakkaasti 9 GHz:n taajuuksilla.

TH9:n ja TH7:n sirontarasterit ovat samankaltaiset 3 GHz:n taajuudella lukuunottamatta vaakasuuntaa (90°), jossa TH9 saavuttaa selvästi suurempia sironta-arvoja. Tämä johtunee siitä, että sen soppien normaalit osoittavat vaakatasoon. TH7:ssä normaalit osoittavat hiukan viistoon. TH9:llä maksimisironta-arvot saavutetaan lähellä vaakatasoa molemmilla taajuuksilla. Etenkin 9 GHz:n taajuudella TH9:n sirontarasteri muistuttaa TH1:n rasteria.

Kuvista käy ilmi, että asettamalla useita soppeja per kerros saadaan aikaan suuria maksimi-arvoja, mutta samalla syntyy syviä minimikohtia säteilykuvion liuskoittumisesta johtuen.

Taulukossa 4 on esitetty tutkaheijastimien korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot. TH1:n, TH7:n ja TH9:n sirontatasot ovat noin kaksinkertaiset verrattuna referenssimalliin (TH140), vaikka niiden poikkipinta-ala on 4,6 - 7,5 kertainen. Tulokset viittaavat siihen, että halkaisijaltaan näin pienissä viitoissa olisi hyvä käyttää korkeampaa tutkaheijastinmallia ja tutkaheijastimet, joissa on yksi soppi per kerros, näyttävät toimivan paremmin kuin ne, joilla on useita soppeja per kerros.

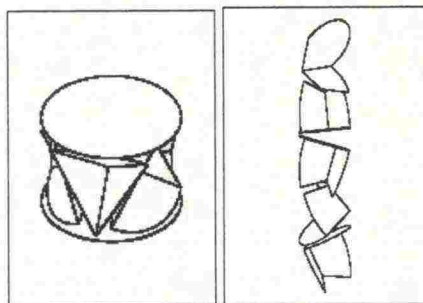
Taulukko 4. TH140:n, TH1:n, TH7:n ja TH9:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

	TH140	TH1	TH7	TH9
Korkeus [cm]	10,30	47,00	77,00	57,00
Suhteellinen	1,00	4,56	7,48	5,53
(3 GHz) [dB]				
Sirontataso	-12,91	-9,23	-9,34	-10,46
Suhteellinen	1,00	2,33	2,28	1,76
(9GHz) [dB]				
Sirontataso	-7,41	-4,69	-4,11	-4,39
Suhteellinen	1,00	1,87	2,14	2,00

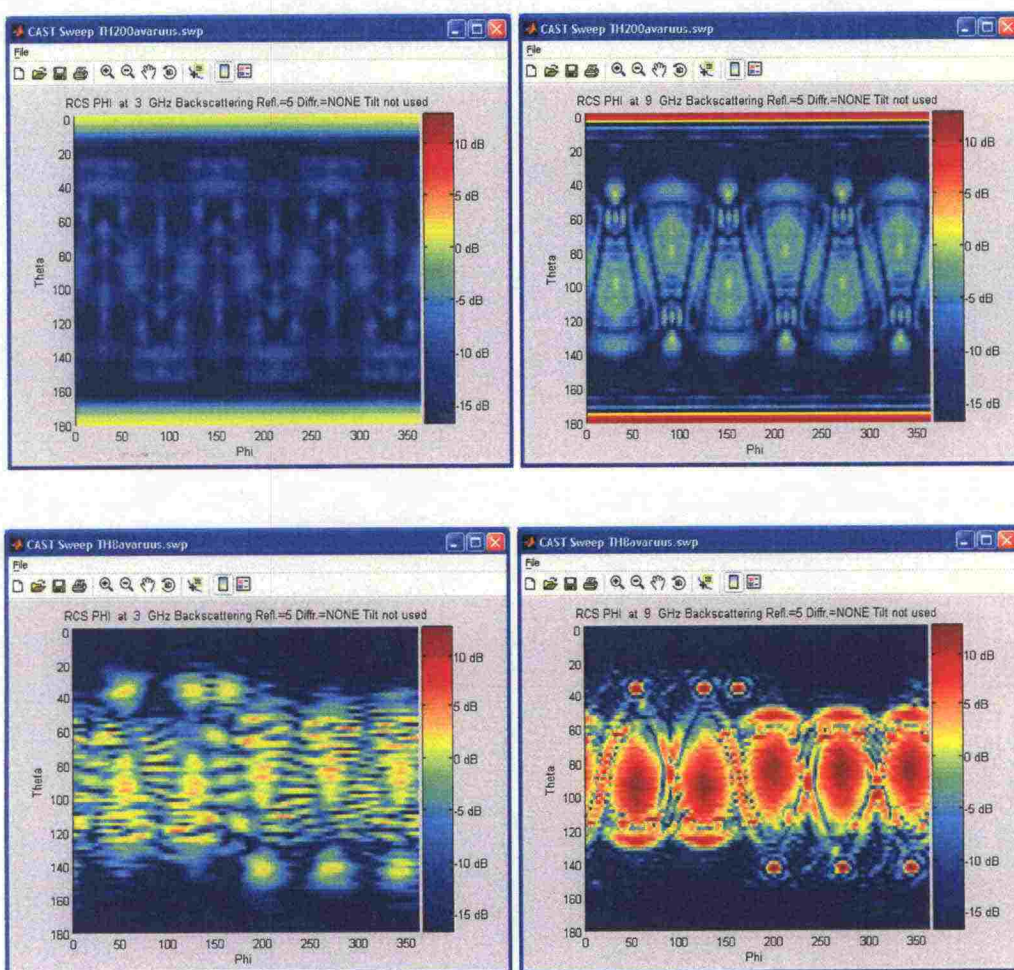
*) Suhteellinen tarkoittaa arvojen normalisointia referenssimallin TH140 arvoilla.

4.2 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)

Toiseen tarkasteluryhmään kuuluivat referenssimalli TH200 ja TH8. Rakenteeltaan ne poikkeavat toisistaan suuresti. TH8:ssa on yksi soppi per kerros, kun taas referenssimallissa kaikki sopet ovat yhdessä kerroksessa. Kuvassa 8 on esitetty CAD-mallit tutkaheijastimista ja niiden sirontarasterit kuvassa 9.



Kuva 8. CAD-mallit tutkaheijastimista, joiden halkaisijat ovat 20 cm. Vasemmalla TH200 ja oikealla TH8.



Kuva 9. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH200 ja TH8. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Rajat ovat 13,0 dB ja -17,0 dB.

Referenssimallin (TH200) sirontataso on molemmilla taajuuksilla selvästi alhaisempi kuin TH8:n. Tämä johtuu siitä, että sen poikkipinta-ala on 7,8 kertaa pienempi kuin TH8:n. Referenssimallin käyttöalue on pystysuunnassa $40^\circ - 140^\circ$. TH8:ssa se on likimain kaksikymmentä astetta kapeampi ($50^\circ - 130^\circ$). TH8:n sirontakuviossa esiintyy 3 GHz:n taajuudella syviä minimejä lähellä vaakatasoa. 9 GHz:n taajuudella sirontarasterissa näkyvät soppien asennot selvästi. Sirontatason maksimit ovat soppien keskipisteissä. 9

GHz:n taajuudella referenssimallissa esiintyy voimakkaita minimikohtia soppien reunoilla. 3 GHz:n taajuudella minimit ovat pienempiä, mutta keskimääräinen sirontataso on vaatimaton. Vaikka TH8:n poikkipinta-ala on 7,8 kertaa suurempi kuin TH200:n, sen keskimääräinen tehotaso on 3 GHz:n taajuudella vain 2,3 kertaa ja 9 GHz:n taajuudella 2,6 kertaa suurempi kuin TH200:n. Tuloksista voidaan vetää johtopäätös, että tämänkin vertailuryhmän referenssimallina olisi hyvä käyttää korkeampaa tutkaheijastinmallia.

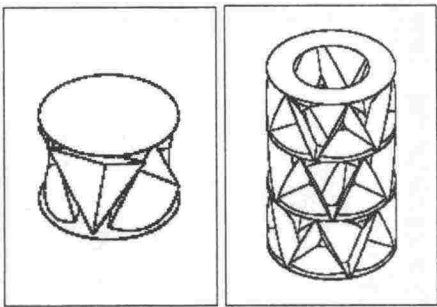
Taulukko 5. TH200:n ja TH8:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

	TH200	TH8
Korkeus [cm]	14,50	113,00
Suhteellinen	1,00	7,79
(3 GHz) [dB]		
Sirontataso	-8,12	-4,42
Suhteellinen	1,00	2,34
(9GHz) [dB]		
Sirontataso	-2,40	1,71
Suhteellinen	1,00	2,58

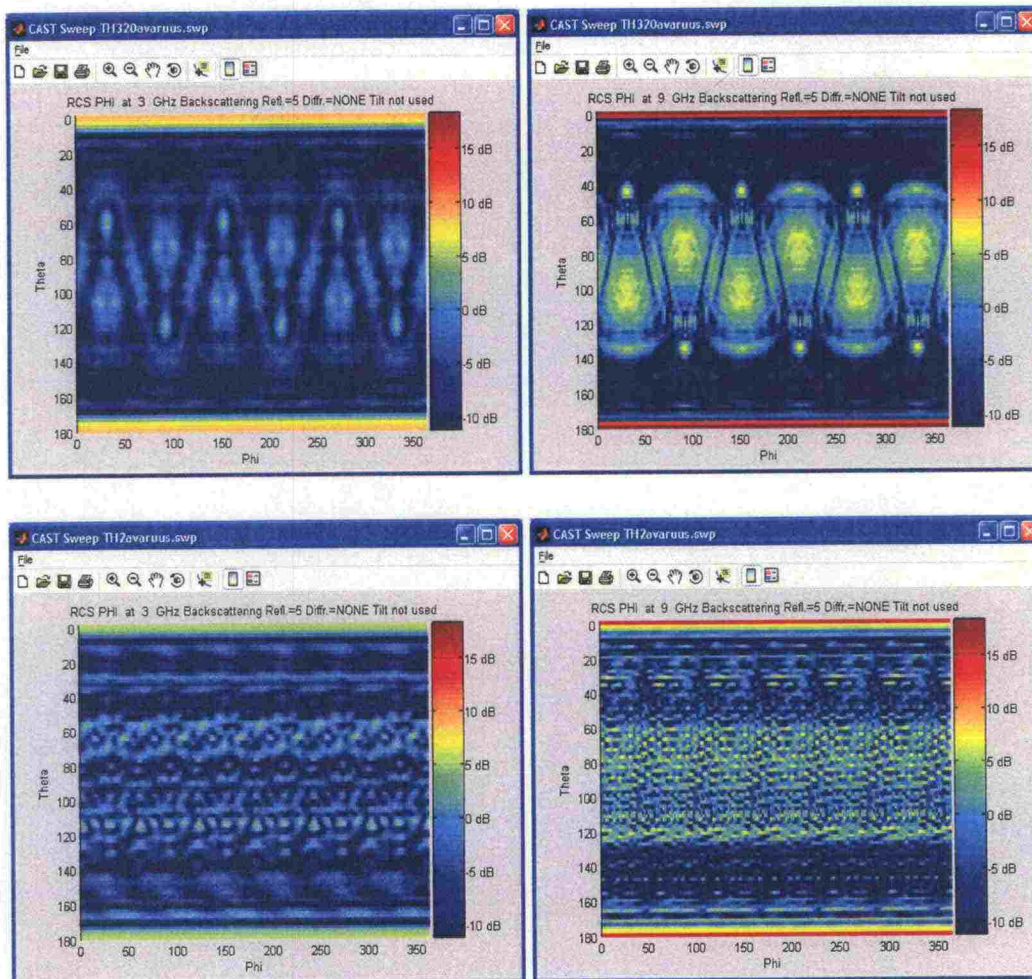
*) Suhteellinen tarkoittaa arvojen normalisointia referenssimallin TH200 arvoilla.

4.3 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)

Kolmanteen tarkasteluryhmään kuuluivat referenssimalli TH320 ja TH2. Mallit eroavat toisistaan siinä, että TH320:ssa kaikki sopet ovat yhdessä kerroksessa ja TH2:ssa kolmessa kerroksessa (Kuva 10). Lisäksi TH320:n soppien kärjet osoittavat vuorotellen ylös- ja alaspäin, kun taas TH2:n sopet ovat aina kärki ylöspäin. Kuvassa 10 on esitetty CAD-mallit tutkaheijastimista ja niiden sirontarasterit kuvassa 11.



Kuva 10. CAD-mallit tutkaheijastimista, joiden halkaisijat ovat 32 cm. Vasemmalla TH320 ja oikealla TH2.



Kuva 11. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH320 ja TH2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksella. Raja-arvot ovat 18,6 dB ja -11,4 dB.

Sirontarastereista näkyy selkeästi ero yksikerroksisen ja monikerroksisen heijastinmallin välillä. TH320:ssa sironta on tasaista laajoilla alueilla, kun taas TH2:n säteilyrasterissa esiintyy enemmän nopeaa tasovaihtelua johtuen säteilykuvion liuskoittumisesta. Soppien asennoilla on myös vaikutusta tuloksiin. TH2:ssa soppien kärjet osoittavat ylöspäin. Tämä synnyttää vaakatason (90°) suhteen epäsymmetrisyyttä sirontarasteriin. Käyttöalue TH320:lla säilyy välillä $40^\circ - 140^\circ$ ja TH2:lla se kapenee välille $55^\circ - 125^\circ$. Molempien heijastimien sirontakuvioissa esiintyy voimakkaita sironta-arvoja ylä- ja alasuuntiin soppien ala- ja yläpuolella olevien pyöreiden tasolevyjen synnyttämänä. TH320:n sirontakuviossa tapahtuu sirontataso putoamista siirryttäessä kohti soppien reunoja. TH2:n säteilykuviossa on hyvin voimakkaita tasovaihteluita sekä pysty- että vaakasuunnassa. TH320:n keskimääräinen sirontataso on yli kaksi kertaa suurempi kuin TH2:n, vaikka sen poikkipinta-ala on alle puolet TH2:n poikkipinta-alasta. Tulokset tukevat aikaisemman tutkimushankkeen [1] tuloksia, joissa todettiin useiden soppikerroksien käytön aiheuttavan säteilykuvion liuskoittumista ja sitä kautta keskimääräistä sirontataso alenemista.

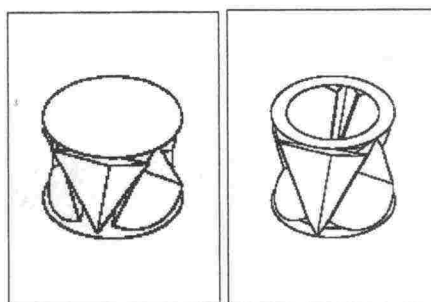
Taulukko 6. TH320:n ja TH2:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

	TH320	TH2
Korkeus [cm]	23,00	53,00
Suhteellinen	1,00	2,30
(3 GHz) [dB]		
Sirontataso	-1,44	-3,35
Suhteellinen	1,00	0,64
(9GHz) [dB]		
Sirontataso	4,42	1,89
Suhteellinen	1,00	0,56

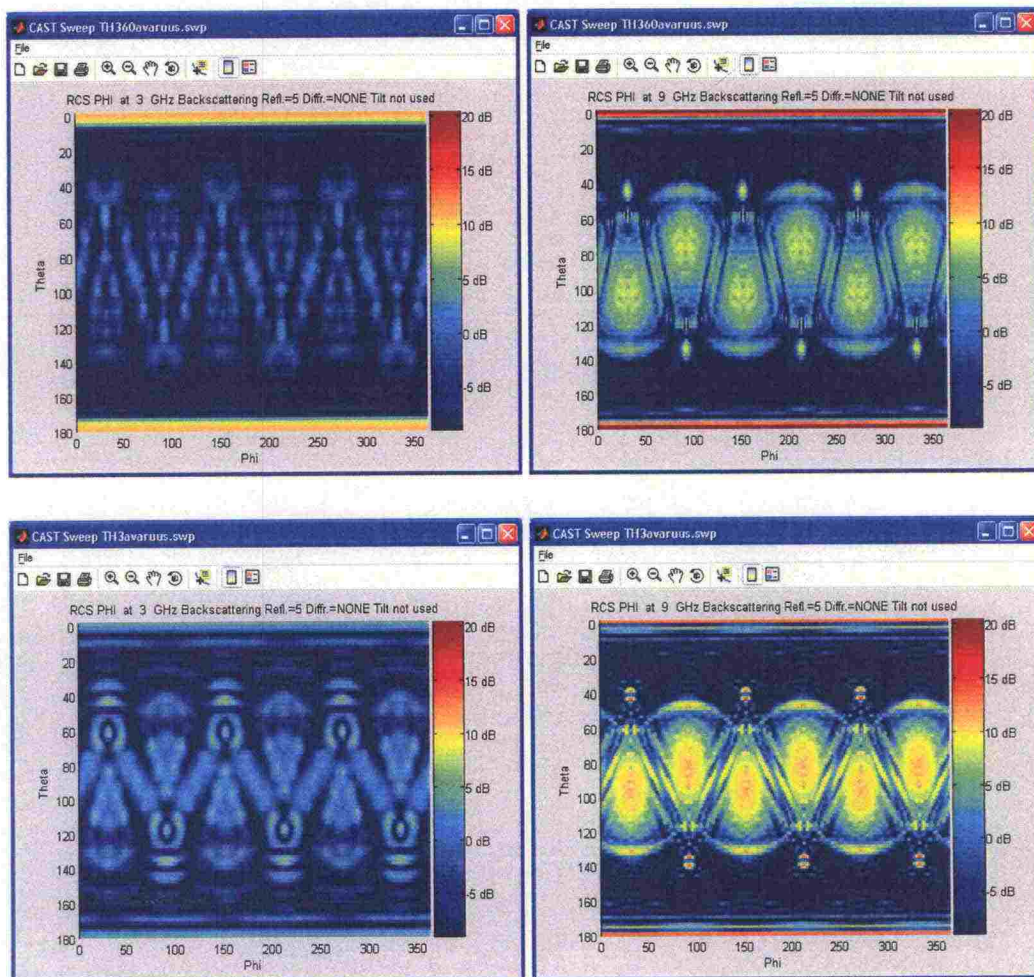
*) Suhteellinen tarkoittaa arvojen normalisointia referenssimallin TH320 arvoilla.

4.4 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)

Neljänteen vertailuryhmään kuuluivat referenssimalli TH360 ja TH3. Mallit ovat rakenteeltaan hyvin samankaltaiset, koska referenssimallin toteutuksessa on otettu mallia TH3:sta. Molemmissa malleissa on kuusi soppea yhdessä kerroksessa vuorotellen kärki ylös- ja alaspäin. Poikkeuksena on se, että referenssimallissa soppien reunat ovat suorat ja niiden normaalit osoittavat vaakatasoon. Soppien koko poikkeaa myös hiukan. Kuvassa 12 on esitetty CAD-mallit tutkaheijastimista ja niiden sirontarasterit kuvassa 13.



Kuva 12. CAD-mallit tutkaheijastimista, joiden halkaisijat ovat 36 cm. Vasemmalla TH360 ja oikealla TH3.



Kuva 13. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH360 ja TH3. Vasemmallalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksilla. Rajat ovat 20,7 dB ja -9,3 dB.

Samankaltaisesta rakenteesta johtuen TH360:n ja TH3:n sirontarasterit ovat hyvin samanlaiset. Molempien mallien käyttöalue on 40° - 140° . Lähellä vaakatasoa muoto on lähes identtinen, mutta TH3:ssa sirontataso on hiukan korkeampi johtuen hiukan suuremmasta poikkipinta-alasta. Molemmissa malleissa esiintyy molemmilla taajuuksilla minimikohtia soppien reuna-alueilla. Kun sirontarasteri normalisoidaan poikkipinta-alalla, TH360:n keskimääräinen sirontataso on korkeampi kuin TH3:n. Tästä voidaan päätellä, ettei soppien reunojen pyöristämisellä saavuteta parannusta – pikemminkin päinvastoin, sirontaominaisuudet voivat jopa heikentyä.

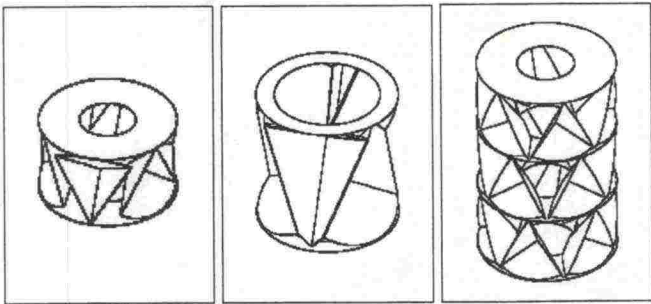
Taulukko 7. TH360:n ja TH3:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

	TH360	TH3
Korkeus [cm]	26,00	32,00
Suhteellinen	1,00	1,23
(3 GHz) [dB]		
Sirontataso	-0,20	-2,18
Suhteellinen	1,00	0,63
(9GHz) [dB]		
Sirontataso	6,19	4,03
Suhteellinen	1,00	0,61

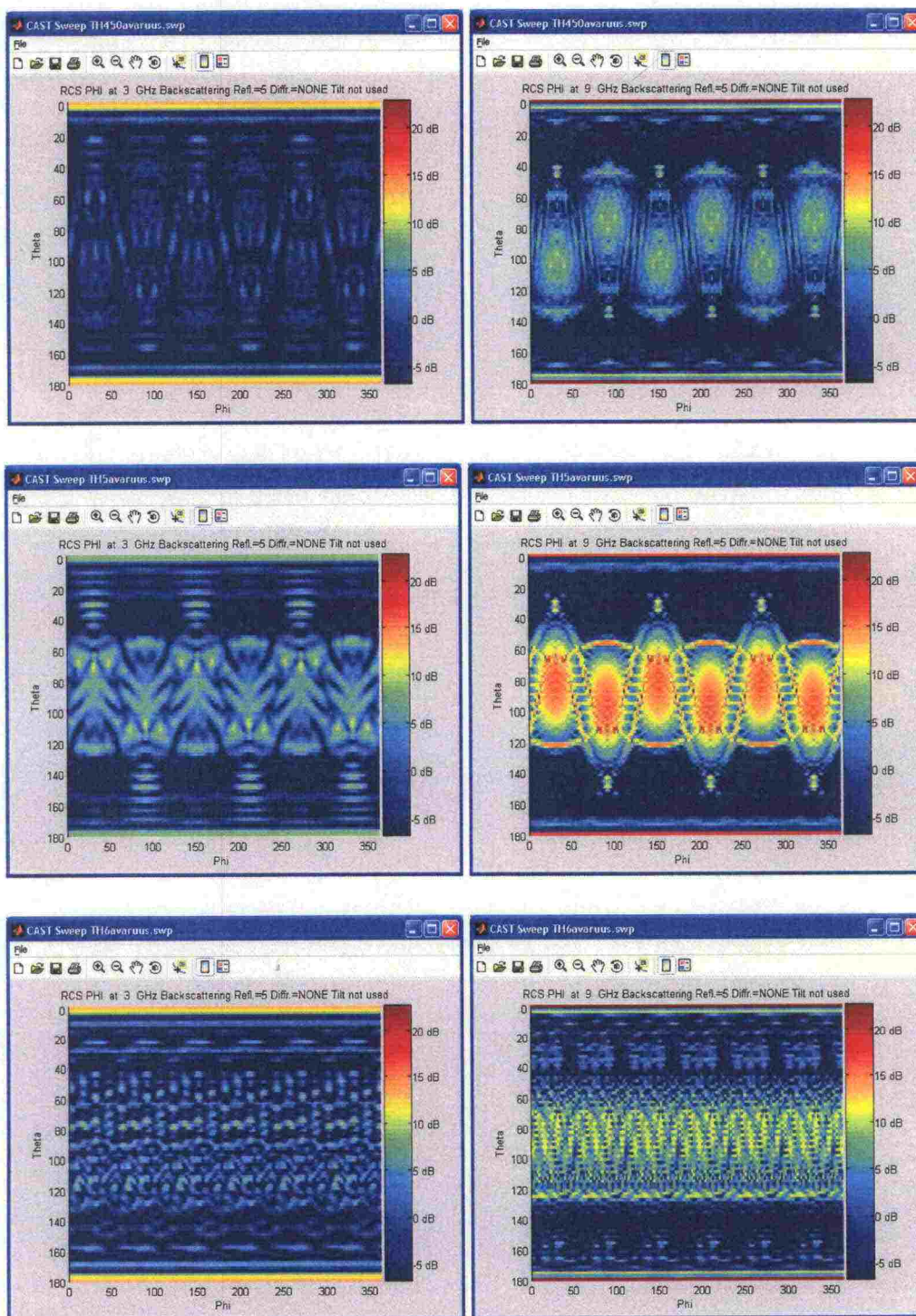
*) Suhteellinen tarkoittaa arvojen normalisointia referenssimallin TH360 arvoilla.

4.5 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)

Viidenteen vertailuryhmään kuuluivat referenssimalli TH450, TH5 ja TH6. TH450 eroaa muista referenssimalleista siten, että siihen on tehty läpivienti paristoputkea varten (Kuva 14). Tämä rajoittaa käytettyjen soppien kokoa. Referenssimallissa soppien väliin jää myös aukkoja. Mallit TH450 ja TH5 muistuttavat toisiaan. Molemmissa malleissa on kuusi soppea vuorotellen kärki ylös- ja alaspäin. TH5:n sopet ovat kookkaampia, koska heijastimeen ei ole mallitettu paristoputken läpivientä. TH5:n soppien normaalit osoittavat hiukan vaakatasosta sivuun. TH6:ssa on useita soppikerroksia ja siihen on mallinnettu paristoputken läpivienti. Soppien normaalit osoittavat vaakatasoon ja kärjet ylöspäin. Kuvassa 14 on esitetty CAD-mallit tutkaheijastimista ja niiden sirontarasterit kuvassa 15.



Kuva 14. CAD-mallit tutkaheijastimista, joiden halkaisijat ovat 45 cm. Vasemmalla TH450, keskellä TH5 ja oikealla TH6.



Kuva 15. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH450 ja TH5 ja TH6. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksilla. Rajat ovat 23,0 dB ja -7,0 dB.

TH450:n soppien välissä olevat aukot aiheuttavat minimikohtia sirontarasteriin, jotka näkyvät molemmilla taajuuksilla. TH5:n sirontarasterissa näkyy soppien suuntaus. Soppien synnyttämät maksimikohdat sijaitsevat hiukan sivussa vaakatasosta. Tästä seuraa, että TH5:n käyttöalue rajoittuu välille $55^{\circ} - 125^{\circ}$. Yleisesti ottaen TH450:n ja

TH5:n sirontarasterit ovat hyvin samankaltaiset molemmilla taajuuksilla. Erot rastereissa johtuvat soppien koko- ja muotoerosta. TH5:n sopet ovat pitkulaisempia ja soppien väliset aukot ovat pienempiä.

TH6:n säteilyrasterissa näkyy molemmilla taajuuksilla monikerrokselliselle heijastimelle tyypillinen säteilykuvion liuskoittuminen. Soppien kärkien osoittaminen samaan suuntaan aiheuttaa säteilyrasterissa epäsymmetrisyyttä vaakatason suhteen. Mallin käyttöalue rajoittuu välille $55^\circ - 125^\circ$. Tämä näkyy etenkin 9 GHz:n taajuudella. Vertailtaessa taulukossa 8 esitettyjä tuloksia havaintaan, että 3 GHz:n taajuudella vertailuryhmän eri heijastinmallien keskimääräisiä sirontatasoja TH6 on selkeästi paras, mutta 9 GHz:n taajuudella erot tasoittuvat merkittävästi. Huomioitava seikka on myös se, että TH5:n keskimääräinen sirontataso on korkeampi kuin TH6:n, vaikka sen poikkipinta-ala on pienempi. Kun sirontarasterit normalisoidaan, saadaan referenssimallilla TH450 paras sirontatuloks. Toteuttamisen kannalta on siis syytä miettiä, olisiko TH450:n korkeutta kasvatettava, jotta se toimisi paremmin myös 3 GHz:n taajuudella.

Taulukko 8. TH450:n, TH5:n ja TH6:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

	TH450	TH5	TH6
Korkeus [cm]	26,00	45,00	69,00
Suhteellinen	1,00	1,73	2,65
(3 GHz) [dB]			
Sirontataso	1,16	1,93	2,35
Suhteellinen	1,00	1,19	1,31
(9GHz) [dB]			
Sirontataso	7,62	8,71	8,36
Suhteellinen	1,00	1,29	1,19

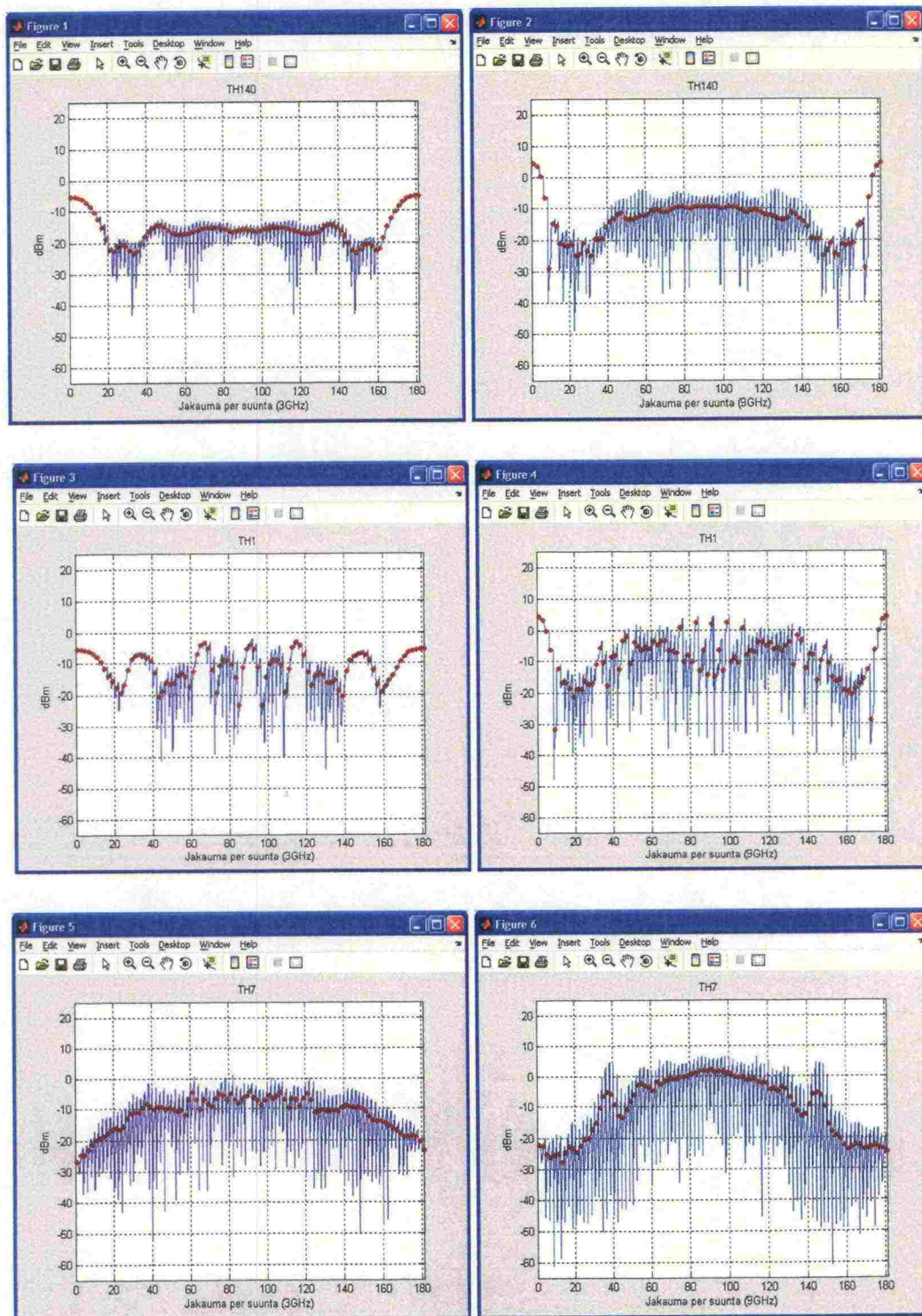
*) Suhteellinen tarkoittaa arvojen normalisointia referenssimallin TH450 arvoilla.

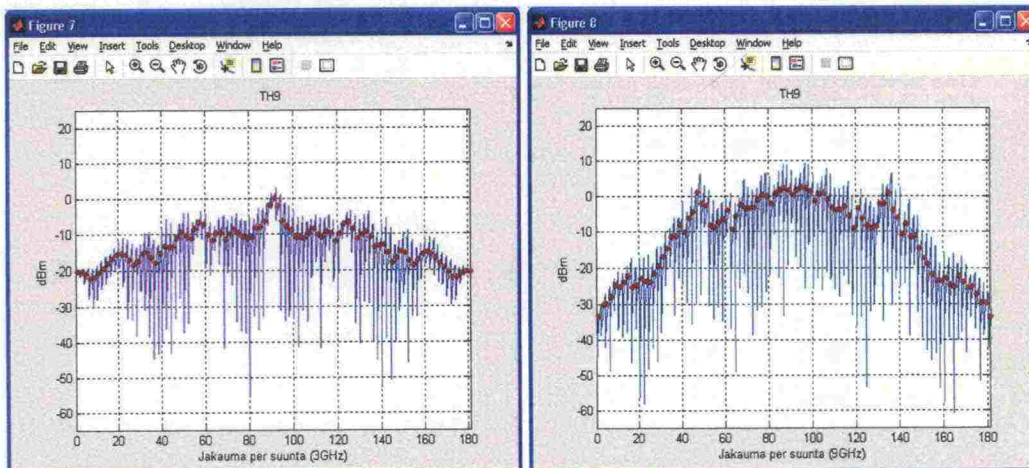
5 Tehotasojen vaihtelujen vertailu

Seuraavaksi selvitettiin sirontatasojen vaihtelua eri tutkamalleilla. Vertailua varten edellisessä luvussa esitetyille sirontarastereille muodostettiin käyräesitykset, joissa takaisinsironta-arvot on lajiteltu pystykulma-kohtaisesti. Näytteitä on kaikkiaan 16 471 (91×181), koska kulmapyyhkäisy on laskettu 2° välein koko kulma-avaruudelle pysty- ja vaakasuunnassa. Vertailussa on esitetty laskentatulokset eri malleille 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla. Kuviissa x-akselina on pystykulma-alue ($0^\circ - 180^\circ$) ja y-akselina tutkapoikkipinta-ala ($-65\text{dB} - 25\text{dB}$). Kuviissa on esitetty punaisella värillä keskimääräiset tutkapoikkipinta-alat eri pystykulmilla helpottamaan tulosten tarkastelua. Analysoinnissa on tarkemmin keskitytty pystykulma-alueelle $40^\circ - 140^\circ$.

5.1 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9)

Kuvassa 16 on esitetty tulokset vertailuryhmään I kuuluvilla malleilla.





Kuva 16. Sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH140, TH1, TH7 ja TH9. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Referenssimallin TH140 tapauksessa sirontataso on tasainen koko tarkasteluvälillä ja hajonnat ovat molemmilla taajuuksilla varsin pieniä. Sirontakuvion minimikohdat sijaitsevat noin 30 asteen välein. Sirontakuvio on hyvin tasainen, mutta sen taso on alhainen verrattuna muihin malleihin.

TH1:ssä tasovaihtelut ovat huomattavasti suurempia kuin TH140:ssä. Kapeita sivukeiloja esiintyy 3 GHz:n taajuudella. Keilojen reunoille on syntynyt syviä minimikohtia ja hajonta siellä on suuri. 9 GHz:n taajuudella sirontakuviossa näkyy vain kaksi leveää keilaa. Soppien asennosta johtuen keilojen maksimisirontasuunnat ovat 60° ja 120° . Hajonta on suurta etenkin minimikohdissa.

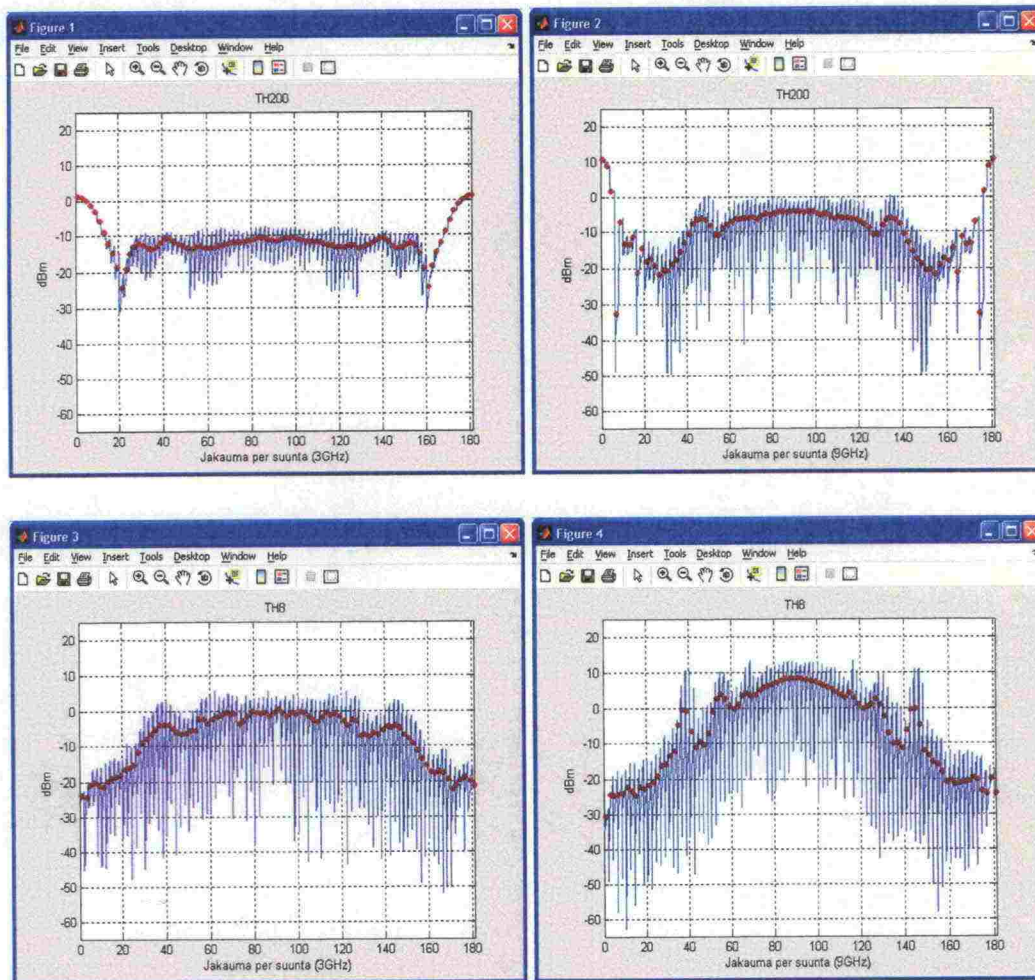
TH7:ssä esiintyy enemmän tasovaihtelua kuin TH140:lla molemmilla taajuuksilla ja hajonta on selvästi suurempi. Referenssimallissa hajonta keskittyy muutamille pystykulmille, kun taas TH7:ssä hajonta on suurta koko tarkastelualueella. 9 GHz:n taajuudella sirontakuviossa näkyy leveä pääkeila. Sen maksimi on suuntaan 90° . Säteiläkuvion reunoille suuntiin 40° ja 140° on ilmestynyt sivukeilat.

TH9:n sirontakuvio vastaa TH7:n sirontakuviota. Poikkeuksena on, etenkin 3 GHz:n taajuudella, kapea ja terävä pääkeila suuntaan 90° . 9 GHz:n taajuudella keila leviää ja madaltuu. Sirontakuvioon ilmestyy samalla sivukeilat suuntiin 40° ja 140° kuten TH7:n tapauksessa. TH9:n heikkoutena on myös suuri hajonta verrattuna TH140:een.

Tulosten perusteella referenssimallin TH140 sirontakuvio on muodoltaan paras, mutta sen tehotaso on vaatimaton.

5.2 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)

Kuvassa 17 on esitetty tulokset vertailuryhmään II kuuluvilla malleilla.



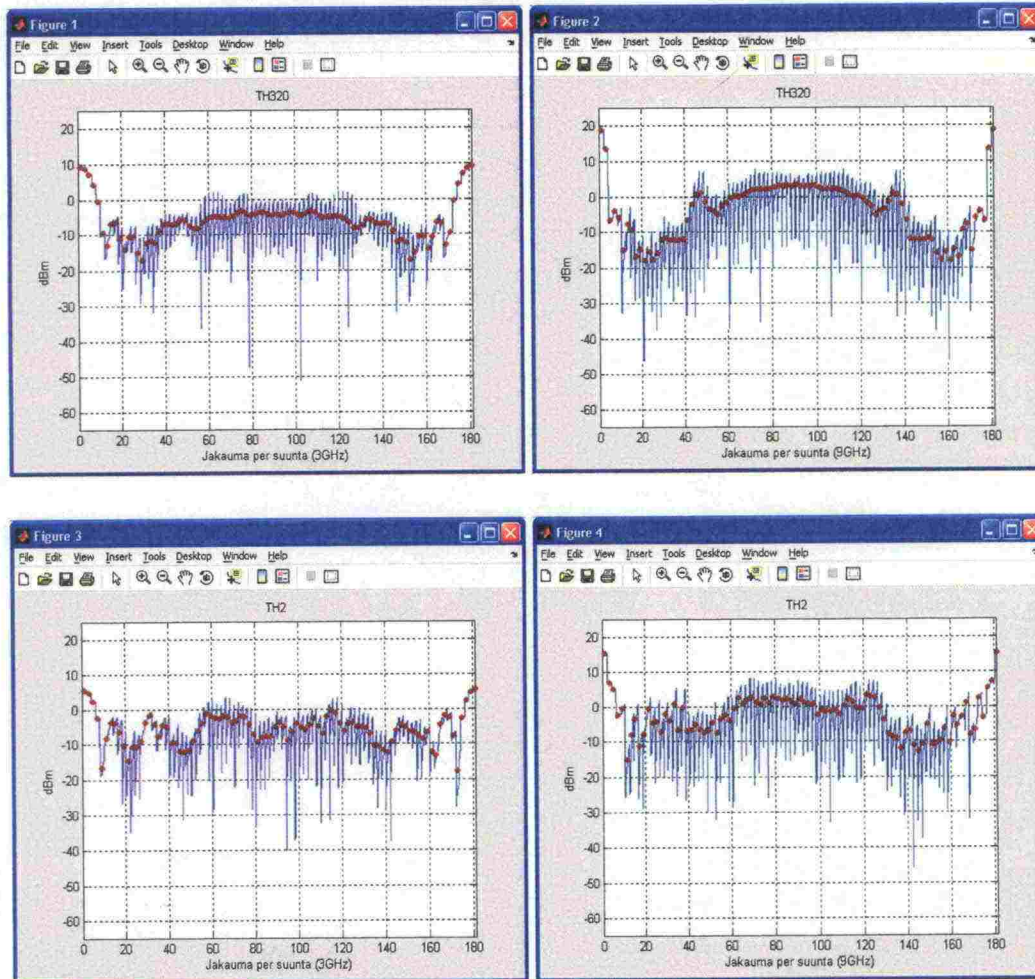
Kuva 17. Sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH200 ja TH8. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Referenssimallin TH200 sirontataso on hyvin tasainen koko tarkasteluvälillä. Hajonta on molemmilla taajuuksilla selvästi pienempi kuin TH8:lla. Hajonta on 3 GHz:n taajuudella jopa pienempi kuin referenssimallilla TH140. 9 GHz:n taajuudella referenssimallin sirontakuviin syntyy sivukeilat suuntiin 40° ja 140° ja hajonta kasvaa verrattuna 3 GHz tapaukseen.

TH8:ssa sirontataso on varsin tasainen 3GHz:n taajuudella. Keskimääräiset tasovaihtelut ja hajonta ovat suurempia kuin referenssimallissa TH200. 9 GHz:n taajuudella sirontakuviin muodostuu leveä keila suuntaan 90° ja kapeat sivukeilat suuntiin 40°, 50°, 130° ja 140°. Keskimääräinen sirontataso on korkea ja muoto on hyvä etenkin silloin, kun otetaan huomioon tutkaheijastimen eri asentojen esiintymistodennäköisyydet. TH8:n merkittävin heikkous on suuri hajonta läpi koko tarkastelualueen.

5.3 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)

Kuvassa 18 on esitetty tulokset vertailuryhmään III kuuluvilla malleilla.



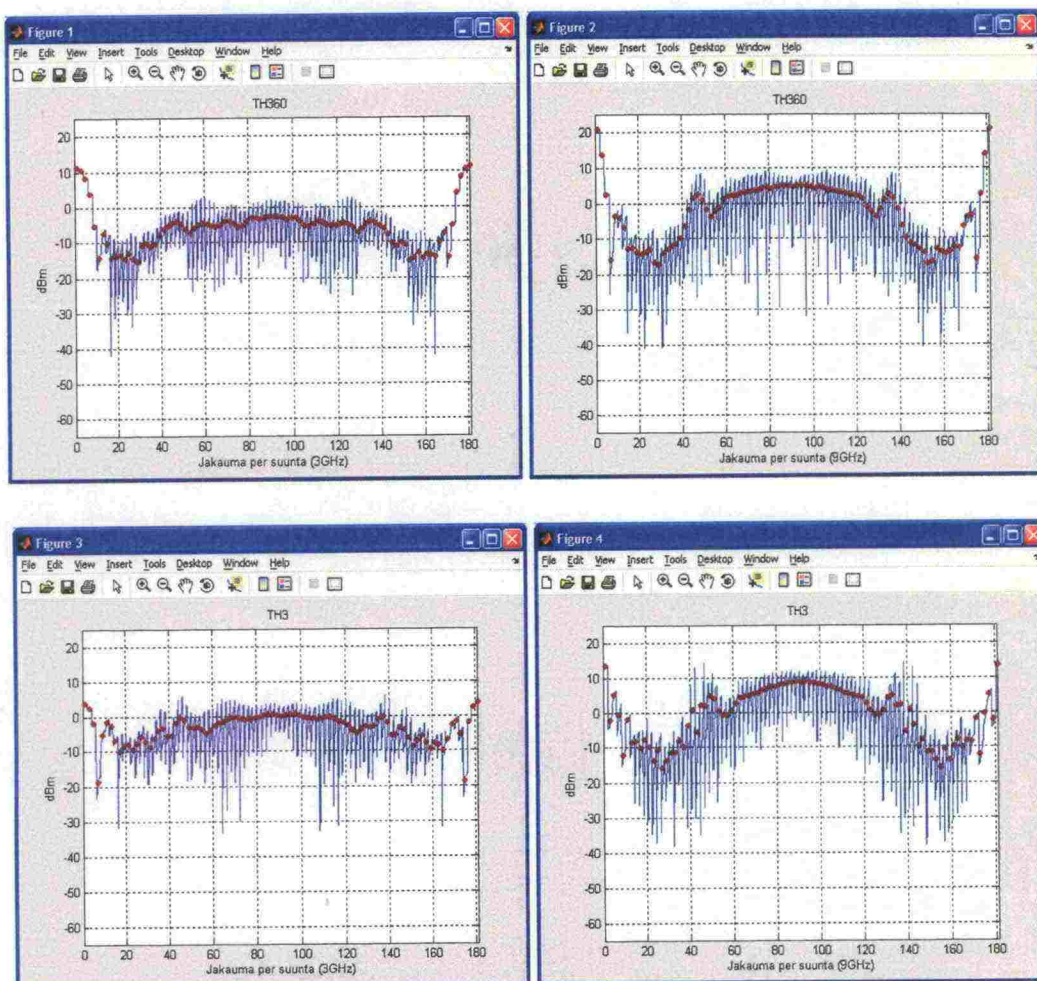
Kuva 18. Sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH320 ja TH2. Vasemmalta ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Referenssimalli TH320:n sirontakuvion muoto 3 GHz:n taajuudella säilyy tasaisena vaikkakin hajonta on selvästi kasvanut referenssimalliin TH200 verrattuna. Sirontakuviossa esiintyy voimakkaita minimipiikkejä eritoten suuntiin 55°, 80°, 100° ja 125°. Hajonta on suuri välillä 60° – 120°. 9 GHz:n taajuudella sirontakuviossa näkyy leveä keila, jonka maksimikohta on suuntaan 90°. Säteilykuviossa näkyy myös selkeät sivukeilat suuntiin 40° ja 140°. Sirontakuvion muoto on samankaltainen TH200:n kanssa. Sivukeilat ovat kuitenkin hiukan voimistuneet ja keskimääräinen hajonta on kasvanut.

TH2:n sirontakuviossa esiintyy enemmän tasovaihtelua ja hajontaa kuin TH320:ssa. Tuloksissa ei kuitenkaan esiinny yhtä voimakkaita minimikohtia kuin TH320:ssa. Keskimääräinen sirontataso on malleilla samaa luokkaa molemmilla taajuuksilla. TH2:n sirontakuviossa esiintyy epäsymmetrisyyttä. 3 GHz:n taajuudella maksimisironta saavutetaan suunnissa 60° ja 115° ja taajuudella 9 GHz suunnassa 125°, kun tarkastelu on rajattu välille 40° - 140°. Mallin käyttöalue on epäsymmetrisyydestä johtuen kapeampi kuin TH320:llä. Se rajoittuu välille 50° - 130°.

5.4 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)

Kuvassa 19 on esitetty tulokset vertailuryhmään IV kuuluvilla malleilla.



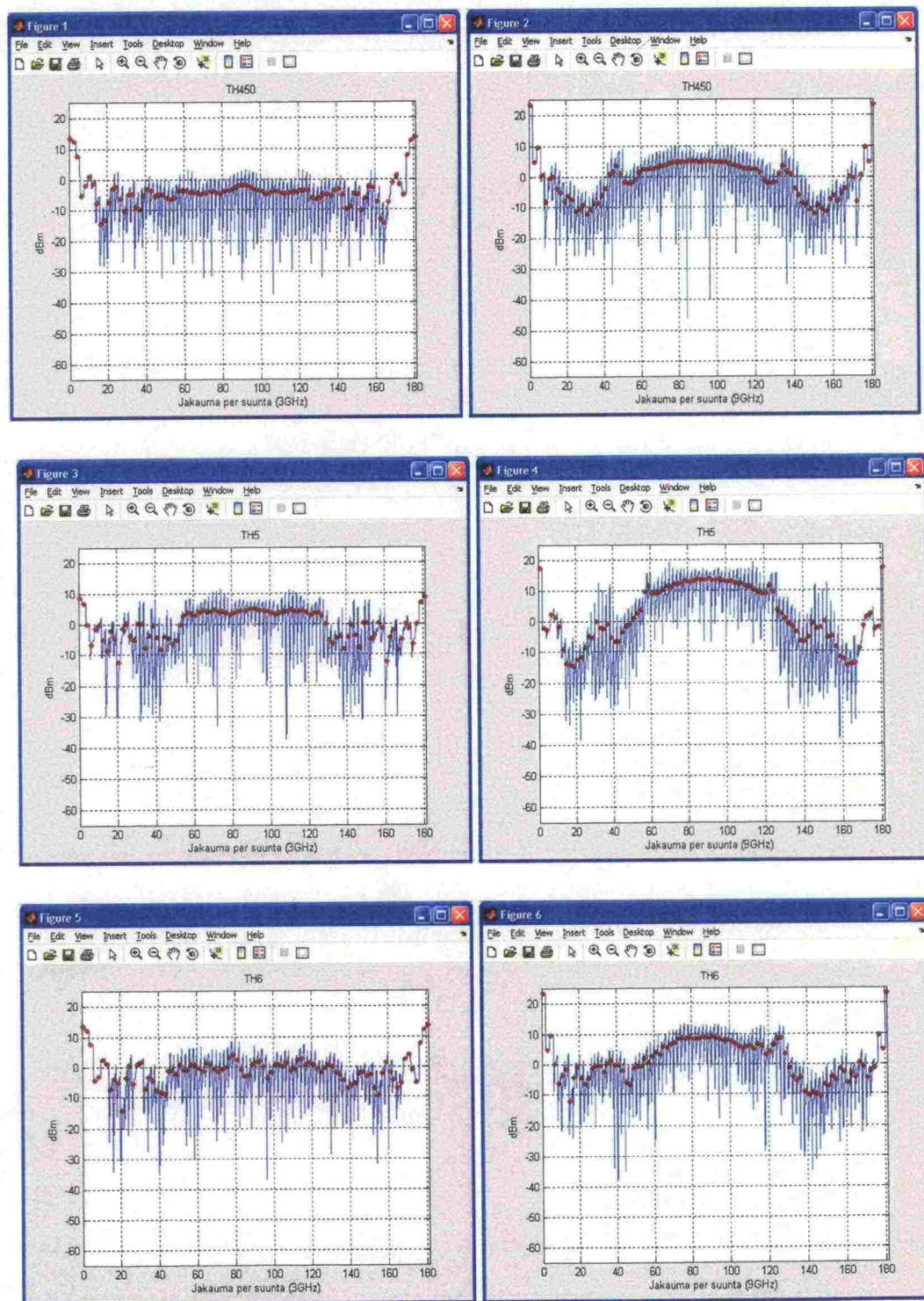
Kuva 19. Sironnakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH360 ja TH3. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Vertailtaessa referenssimalleja TH360 ja TH320 keskenään merkittävin ero on suurien minimikohtien häviäminen. Lisäksi TH360:n sivukeilat ovat voimistuneet. Hajonta pysyy varsin pienenä.

TH3:n ja TH360:n sironnakuviot ovat samankaltaiset. Keskimääräinen sironnataso on TH3:ssa hiukan korkeampi ja hajonta pienempi kuin TH360:ssä. Kuvasta nähdään, että TH3:n sironnakuviossa hajonta on pientä lähellä vaakatasoa, mutta se kasvaa siirryttäessä kohti tarkastelualueen reunoja. TH3:n sivukeilojen profiili on leveämpi ja matalampi kuin TH360:n.

5.5 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)

Kuvassa 20 on esitetty tulokset vertailuryhmään V kuuluvilla malleilla.



Kuva 20. Sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH450, TH5 ja TH6. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Referenssimallin TH450 sirontakuviot on varsin tasainen 3 GHz:n taajuudella. Keskimääräinen hajonta on kasvanut referenssimalliin TH320 nähden. Tämä johtune osaksi soppien väliin jäävistä aukoista. Kuvassa näkyy 9 GHz:n taajuudella leveä

pääkeila, joka kattaa lähes koko tarkastelualueen. Keilan maksimikohta on suuntaan 90°. Pääkeilan sivuilla on lisäksi heikommät sivukeilat suuntiin 40° ja 140°. Sirontakuvio vastaa muodoltaan aikaisempien referenssimallien kuvioita. Merkittävin ero on 9 GHz:n taajuudella esiintyvät voimakkaat minimikohdat.

TH5:n sirontakuvio on muodoltaan samanlainen kuin TH450:ssa joskin käyttöalue on kaventunut välille 55° - 125°. TH5:n keskimääräinen hajonta on molemmilla taajuuksilla pienempi ja sirontataso korkeampi kuin TH450:lla. 9 GHz:n taajuudella myös TH5:lla on sivukeilat suuntiin 60° ja 120°, mutta ne ovat selvästi TH450:n sivukeiloja matalampia.

TH6:ssa keskimääräinen tasovaihtelu on molemmilla taajuuksilla suurempi ja hajonta pienempi kuin TH450:llä. Sirontakuviossa on epäsymmetrisyyttä, joka näkyy selvemmin 9 GHz:n taajuudella. Soppien asennosta johtuen maksimisironta tarkastelualueella on suuntaan 125°.

Vertailtaessa tarkasteluryhmän malleja keskenään voidaan parhaimmaksi malliksi sirontakuvion perusteella valita TH5. Sen hyvät sirontaominaisuudet perustuvat sen suureen fyysiseen kokoon ja kookkaisiin soppeihin. Mallissa ei ole huomioitu paristoputken läpivientä.

6 Tarkasteluvälin rajausta ja sironta-arvojen keskiarvoistaminen

Analysointia tarkennettiin rajaamalla tarkasteluväli pystykulma-alueelle 40° - 140°, koska alueen ulkopuolella soppien vaikutus tutkapoikkipinta-alaan on vähäinen. Siellä sirontatasoon vaikuttavat eniten soppien ylä- ja alapuolelle mallitetut pyöreät tasolevyt. Laskennalliset epätarkkuudet ja nopeat vaihtelut poistettiin tuloksista liukuvalla keskiarvoistusikkunalla. Tähän käytettiin 3x3 painokerroinmatriisia, joka huomioi myös viereisten pysty- ja vaakasuuntien sironta-arvot. Matriisin painokertoimet ovat

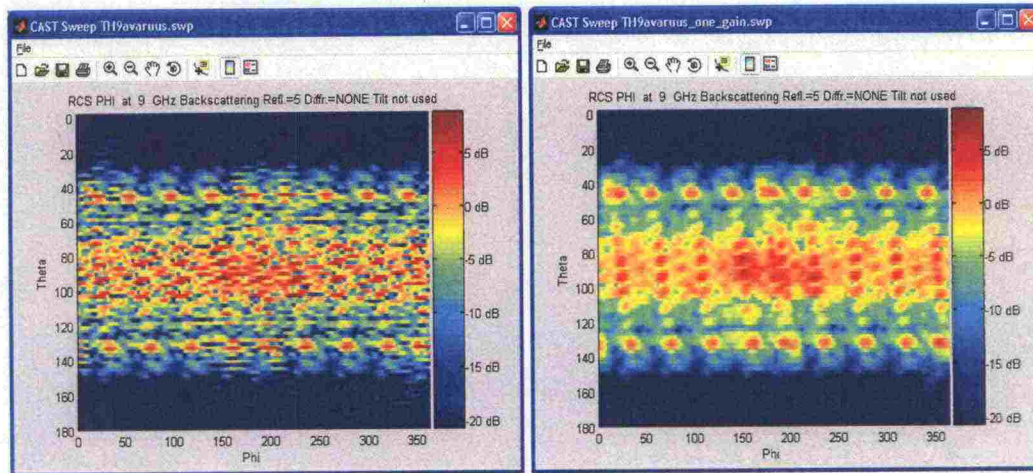
$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Painokertoimien arvot perustuvat etäisyyteen laskettavasta pikselistä. Laskettavan pikselin kohdalla olevalle sironta-arvolle annetaan painokerroin 4, viereisille pysty- ja vaakapikseleille 2 ja viereisille diagonaalipikseleille 1. Keskiarvoistettu tutkapoikkipinta-ala σ_{ij}^k saadaan kaavasta

$$\sigma_{ij}^k = \frac{1}{S} \sum_{l=j-1}^{j+1} \sum_{m=i-1}^{i+1} w_{l,m} \sigma_{l,m}, \quad (2)$$

missä S on painokertoimien summa, w on painokerroin, σ on laskettu tutkapoikkipinta-ala, i on säteilyrasterin rivi ja j sen sarake. Tulos muutetaan keskiarvoistuksen jälkeen

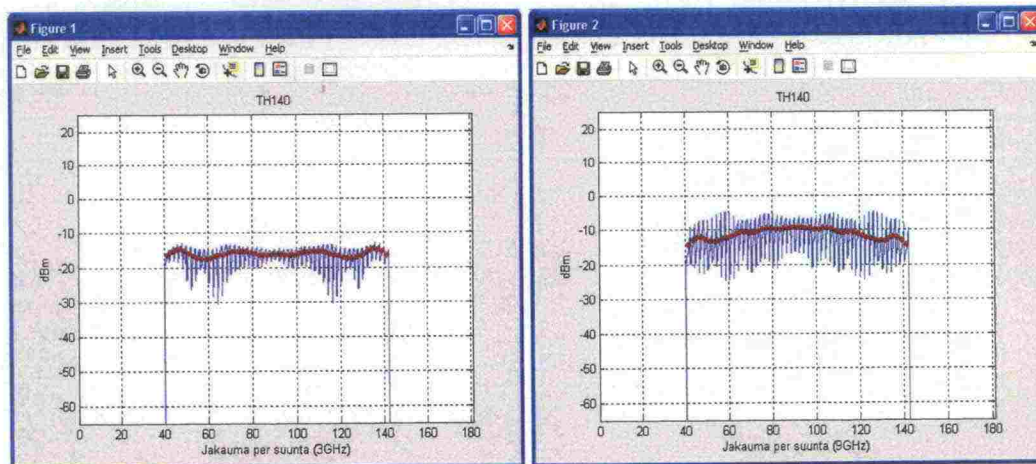
desibelimuotoon. Kuvassa 21 on esitetty TH9:n sirontarasteri ennen ja jälkeen keskiarvoistuksen. Keskiarvoistus poistaa sirontarasterista tasovaihtelua ja tuo dominoivat piirteet esille.

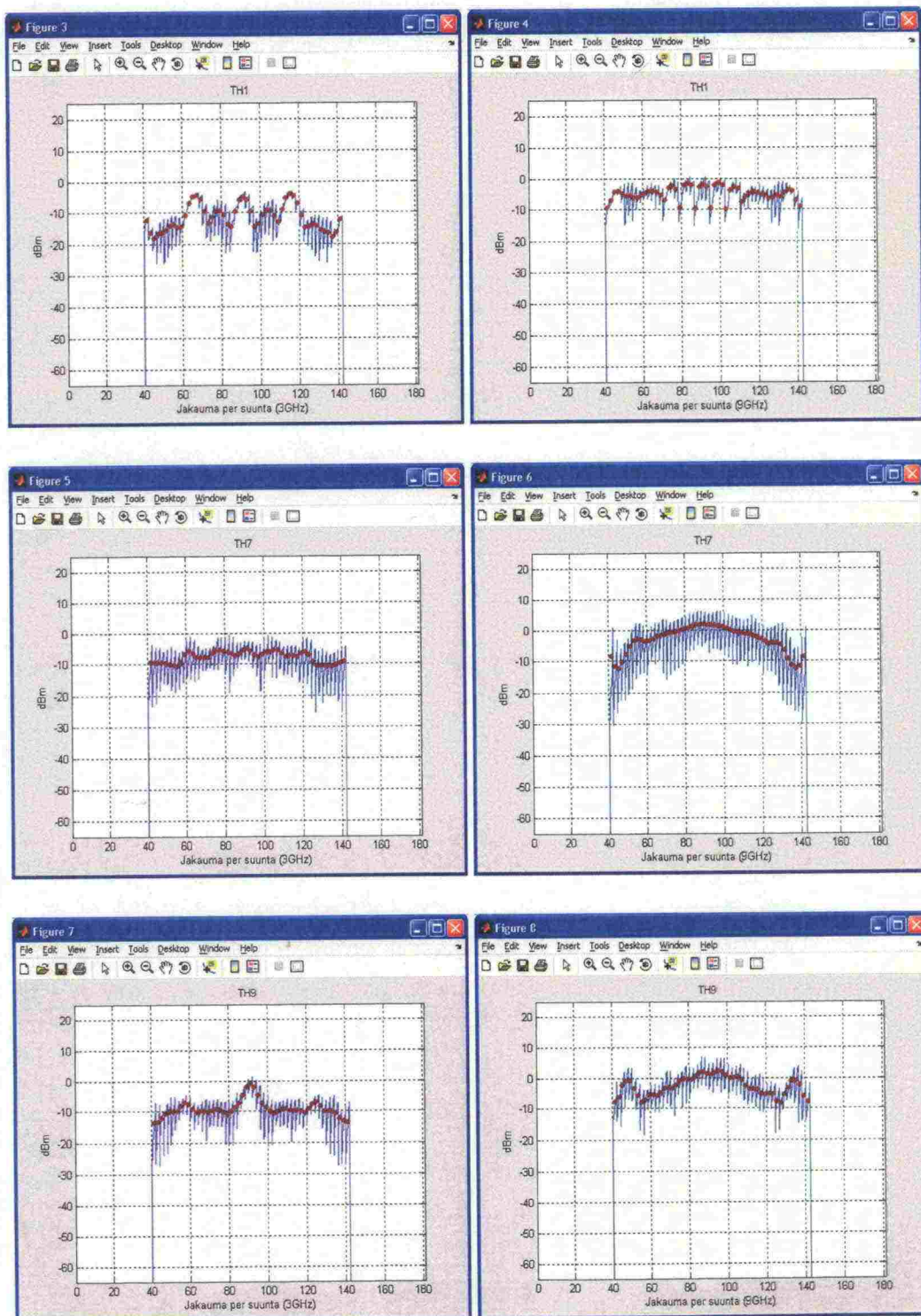


Kuva 21. TH9:n sirontarasteri 9 GHz:n taajuudella ennen ja jälkeen keskiarvoistuksen.

6.1 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9)

Kuvassa 22 on esitetty 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla tarkasteluryhmään I kuuluvien tutkaheijastinmallien sirontakuviot rajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen. Punaisella viivalla on esitetty keskimääräinen sirontataso.





Kuva 22. Keskiarvoistetut sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH140, TH1, TH7 ja TH9. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

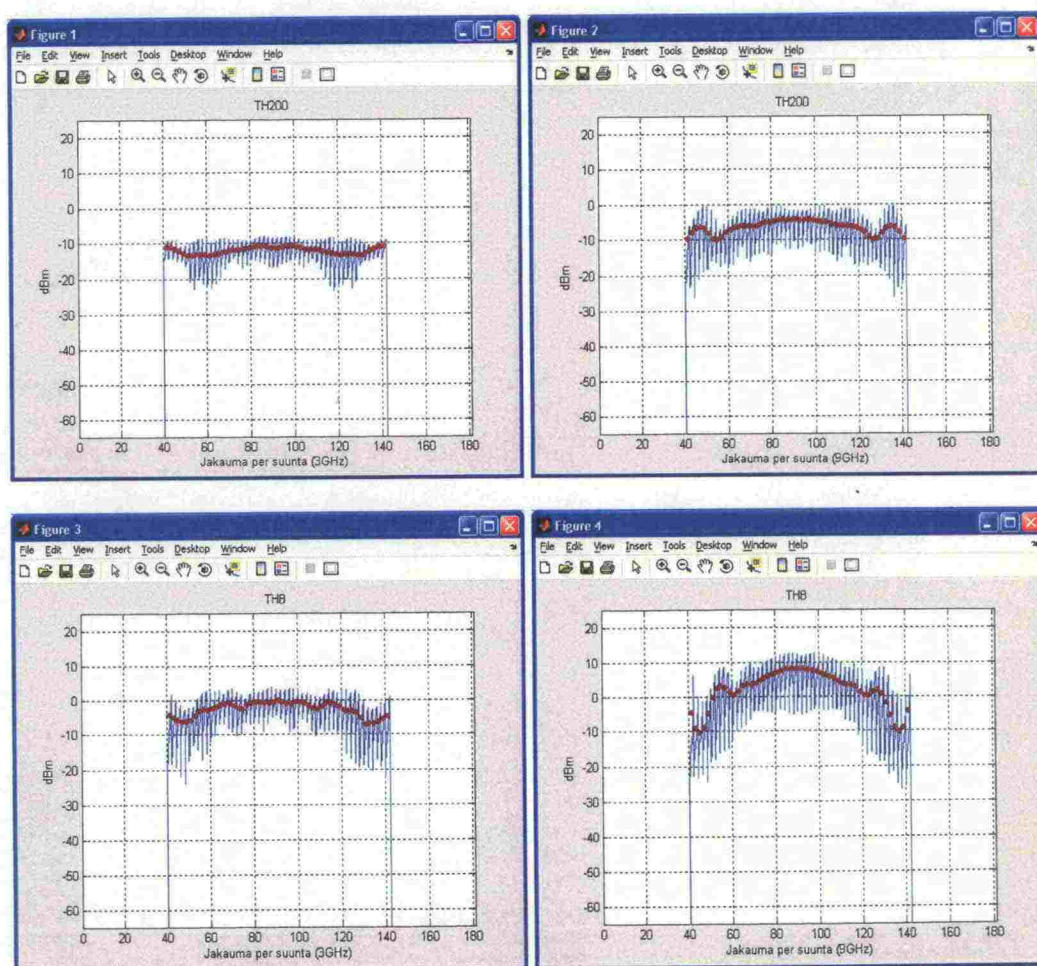
Kuvasta 22 nähdään, että sirontakuvio on tasaisin TH140:lla. Hajonta on suurinta TH140:llä ja TH7:llä. 3 GHz:n taajuudella TH140:n hajonnan maksimipiikit ovat suunnissa 60° ja 120°. Toiset, selvästi pienemmät, piikit ovat kohdissa 50° ja 130°. 9 GHz:n taajuudella hajonta on lähes vakio koko tarkastelualueella. TH7:ssä hajonta on

molemmilla taajuuksilla likimain vakio. TH1:n sirontakuviossa näkyy molemmilla taajuuksilla 5 keilaa, joista keskimmäisin osoittaa suuntaan 90° . 3 GHz:n taajuudella sen vieressä olevat keilat ovat selvästi heikompia. Hajonta niissä ja tarkastelualueen reunoilla on suurta. 9 GHz:n taajuudella keilojen väliset erot tasoittuvat. Niiden väliin jää voimakkaita minimikohtia.

TH7:n ja TH9:n sirontakuviot ovat samankaltaiset. TH7:n sirontakuviossa vaakasuuntaan erottuu heikosti pääkeila, kun taas TH9:ssä se näkyy selvästi. Hajonta TH7:ssä on suurempi kuin TH9:ssä. TH7:ssä hajonta pysyy likimain vakiona koko tarkasteluvälillä, kun taas TH9:ssä suuret hajonta-arvot ovat keskittyneet minimikohtien läheisyyteen. 9 GHz:n taajuudella molemmissa malleissa on leveä pääkeila suuntaan 90° . Sivukeilat tarkastelualueen reunoilla ovat TH9:ssä voimakkaammat kuin TH7:ssä.

6.2 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)

Kuvassa 23 on esitetty tarkasteluryhmään II kuuluvien tutkaheijastinmallien sirontakuviot rajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen.



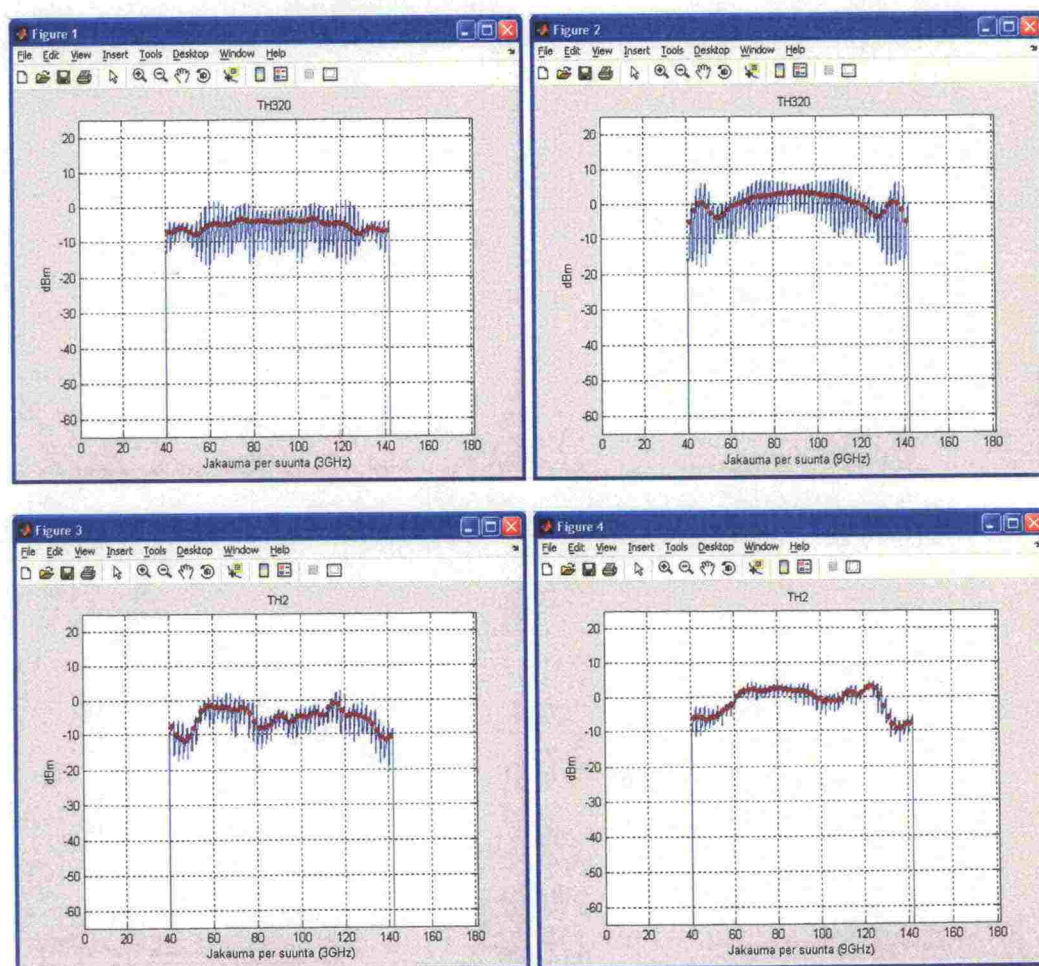
Kuva 23. Keskiarvoistetut sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH200 ja TH8. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Kuvista 22 ja 23 nähdään, että referenssimallin koon kasvattaminen nostaa keskimääräistä sirontatasoa. Mielenkiintoista on se, että hajonta on TH200:lla pienempi kuin TH140:llä. Molemmissa malleissa näkyy 3 GHz:n taajuudella hajonnan kasvu suuntien 60° ja 120° ympärillä. 9 GHz:n taajuudella hajonta tasoittuu molemmilla malleilla.

3 GHz:n taajuudella TH8:lla tasovaihtelut ovat hiukan suurempia kuin TH200:lla, mutta sen tehotaso on selvästi korkeampi. 9 GHz:n taajuudella TH8:n sirontakuviossa näkyy leveä pääkeila, jonka maksimi on TH200:a suurempi. TH8:ssa pääkeilan sirontataso putoaa nopeammin kuin TH200:ssa siirryttäessä kohti tarkastelualueen reunoja. TH8:ssa hajonta pysyy lähes vakiona molemmilla taajuuksilla, mutta se on suurempaa kuin TH140:ssä.

6.3 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)

Kuvassa 24 on esitetty tarkasteluryhmään III kuuluvien tutkaheijastinmallien sirontakuviot rajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen.



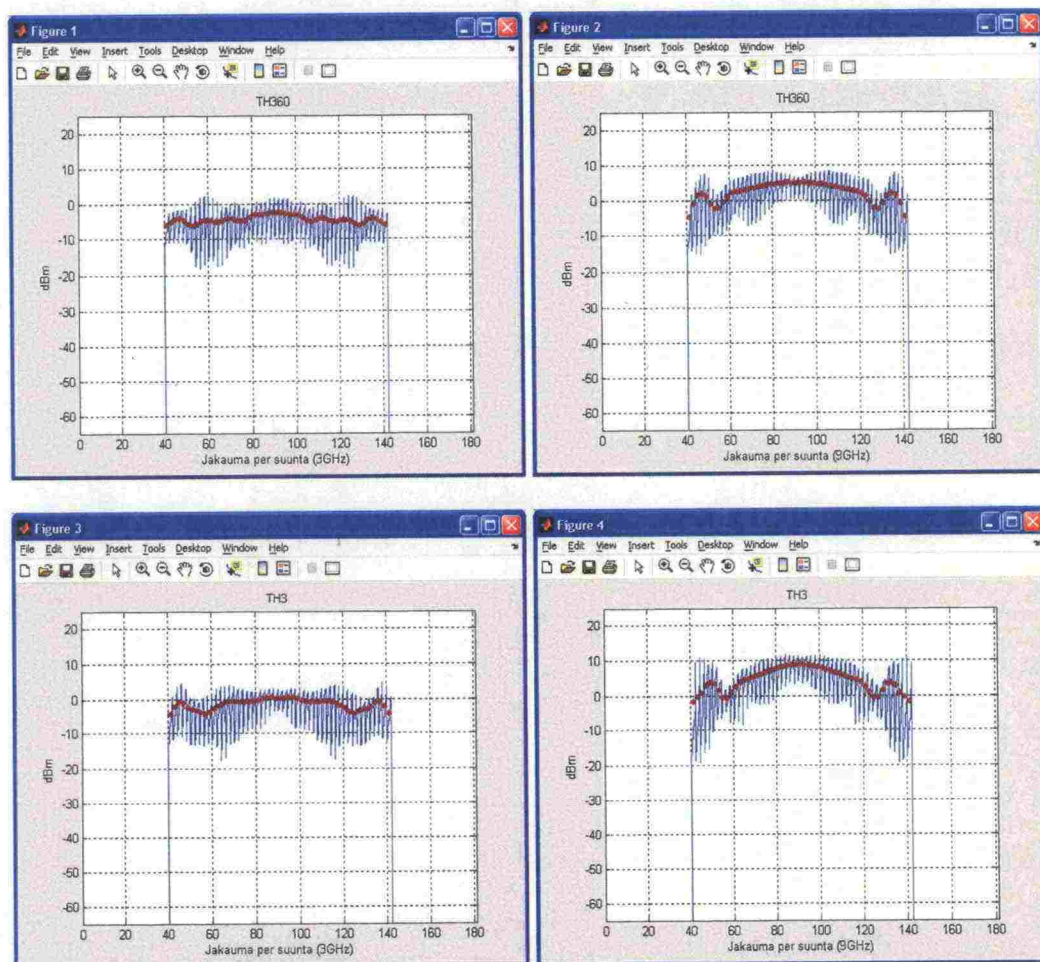
Kuva 24. Keskiarvoistetut sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH320 ja TH2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Vertailtaessa TH320:n ja TH200:n sirontakuvioita havaitaan, että hajonta on merkittävästi kasvanut välillä $65^\circ - 115^\circ$ ja keskimääräinen sirontataso on noussut noin 5 dB.

TH2:n keskimääräinen sirontataso on samaa luokkaa referenssimallin TH320 kanssa. Tasovaihtelut ovat kuitenkin suurempia. Hajonta on TH2:ssa pienempi kuin TH320:ssä. TH2:n sirontakuvio on epäsymmetrinen johtuen soppien asennoista. 3 GHz:n taajuudella sirontakuvion maksimiarvo saavutetaan suunnassa 115° ja 9 GHz:n taajuudella suunnassa 125° .

6.4 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)

Kuvassa 25 on esitetty tarkasteluryhmään IV kuuluvien tutkaheijastinmallien sirontakuviot rajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen.



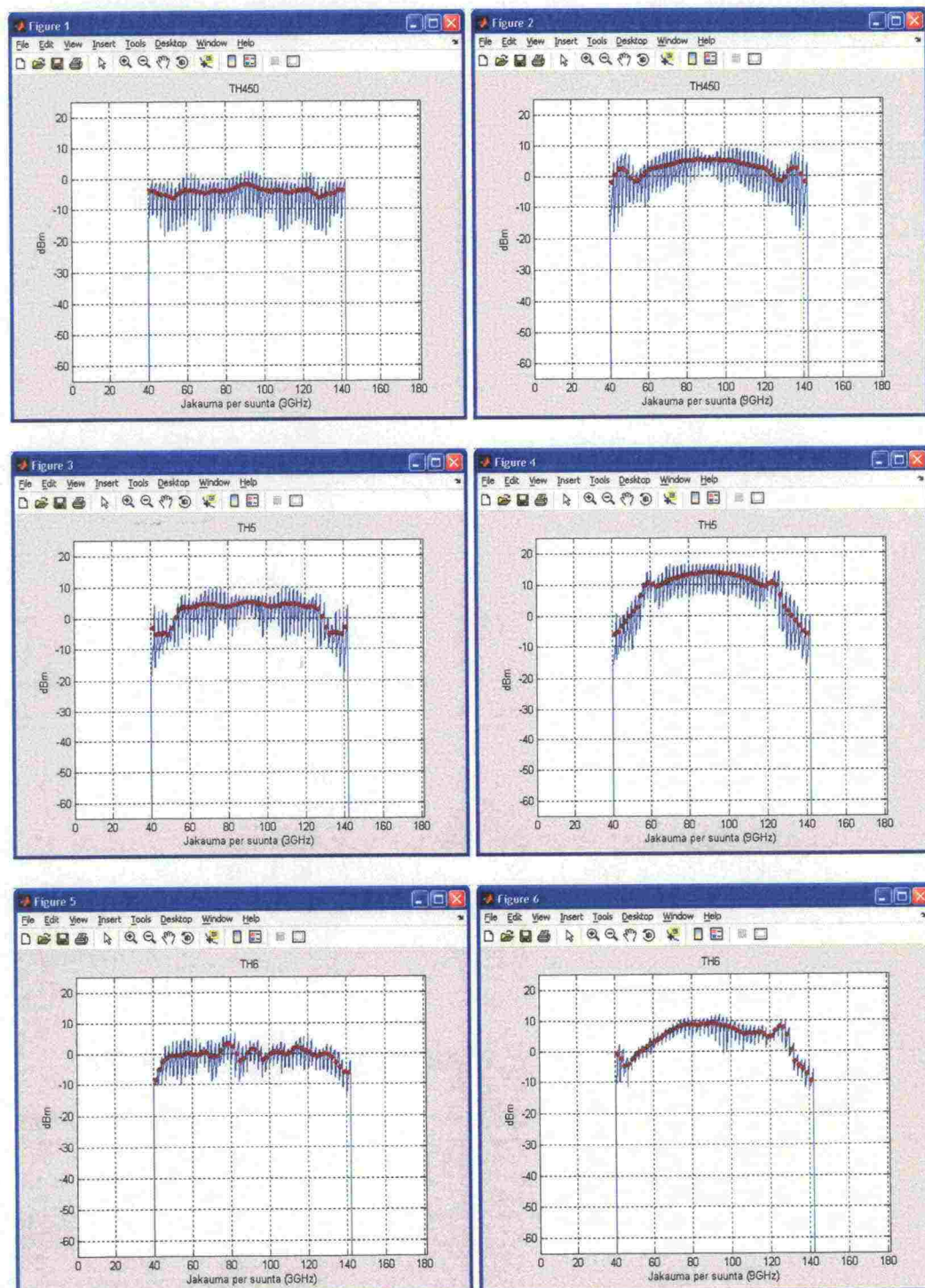
Kuva 25. Keskiarvoistetut sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH360 ja TH3. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

TH360:n ja TH3:n sirontakuviot ovat samanlaiset 3 GHz:n taajuudella. TH360:lla on hieman korkeampi keskimääräinen sirontataso ja siinä näkyy vähemmän hajontaa lähellä vaakatasoa kuin TH360:ssä. Hajonta kuitenkin kasvaa nopeasti siirryttäessä kohti tarkastelualueen reunoja. 9 GHz:n taajuudella TH3:n pääkeilan maksimiarvo on noin 5

dB suurempi kuin TH360:ssa. Myös TH3:n hajonta kasvaa nopeasti siirryttäessä tarkastelualueen reunoja kohti.

6.5 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)

Kuvassa 26 on esitetty tarkasteluryhmään V kuuluvien tutkaheijastinmallien sirontakuviot rajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen.



Kuva 26. Keskiarvoistetut sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH450, TH5 ja TH6. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

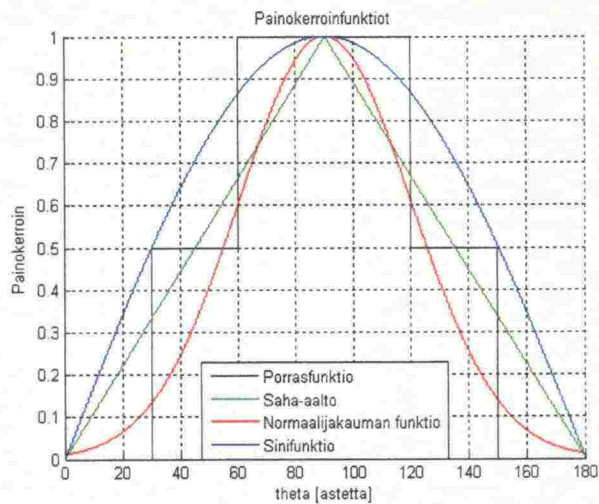
TH450:n ja TH5:n sirontakuvioissa on selkeä ero. TH5:n sirontakuviossa näkyy askelmainen kasvu välillä 55° ja 125° . Se johtunee soppien koko- ja muotoeroista. TH5:ssa sopet ovat kookkaampia ja pitkulaisempia. Hajonta TH450:ssa ja TH5:ssa on samaa luokkaa, joskin 3 GHz:n taajuudella TH5:ssa hajonta on pienempää lähellä vaakatasoa kuin TH450:ssä. 9 GHz:n taajuudella tilanne vaihtuu mallien kesken. Molempien mallien sirontakuvioissa näkyy leveä pääkeila vaakatasoon ja kapeat sivukeilat reuna-alueilla. Sivukeilat näkyvät hyvin selkeinä etenkin 9 GHz:n taajuudella.

TH6:ssa kaikkien soppien kärjet osoittavat ylöspäin. Tämä aiheuttaa epäsymmetrisyyttä sirontakuvioon. Tästä osittain johtuen tasovaihtelut ovat TH6:ssa suurempia kuin TH450:ssä molemmilla taajuuksilla. Merkittävää on kuitenkin se, että hajonta TH6:n sirontakuviossa on molemmilla taajuuksilla huomattavasti pienempi kuin TH450:lla tai TH5:lla.

7 Tutkaheijastimen asennon huomiointi

7.1 Todennäköisyysfunktio

Lähtökohtana on, että viitta, johon tutkaheijastin kiinnitetään, pyritään asettamaan pystyasentoon, mutta veden virtaus ja jäät muuttavat sen asentoa. Eri asentojen todennäköisyyttä voidaan tilastollisesti mallintaa erilaisilla todennäköisyysfunktioilla. Tarkasteluvaiheen aikana kehitettiin neljä erilaista funktiota. Yksinkertaisin niistä oli porraskfunktio, jossa todennäköisyys kasvaa portaittain kohdissa 30° ja 60° , ja vastaavasti laskee kohdissa 120° ja 150° . Toisena funktiona kokeiltiin saha-aaltofunktiota, jonka painokerroin kasvaa 0:sta 1:een lineaarisesti eli funktion kulmakerroin on vakio. Kolmas funktio oli Bell-funktio, jossa painokertoimen arvo seuraa normaalijakaumaa. Lopuksi kokeiltiin sinifunktiota, jossa painokerroin lasketaan sinifunktiosta. Eri todennäköisyysfunktioiden tuottamat painokertoimet θ -kulman suhteen on esitetty kuvassa 27.

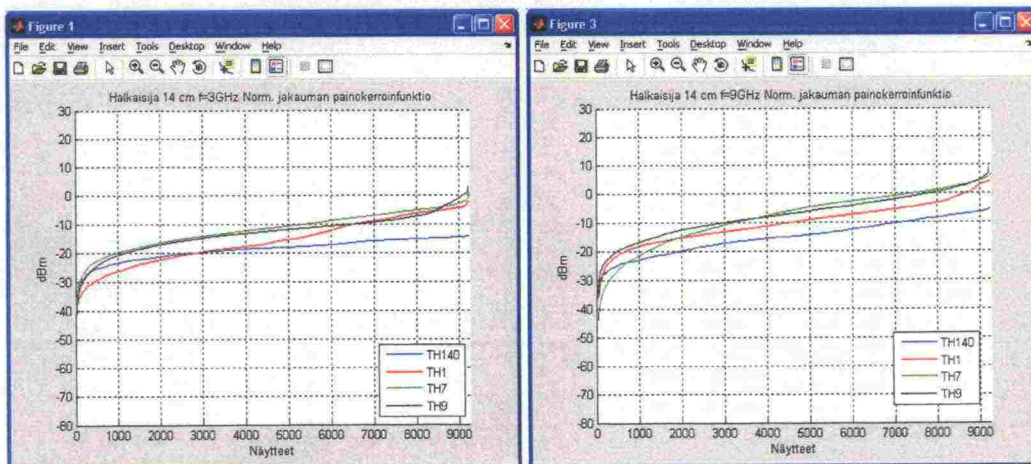


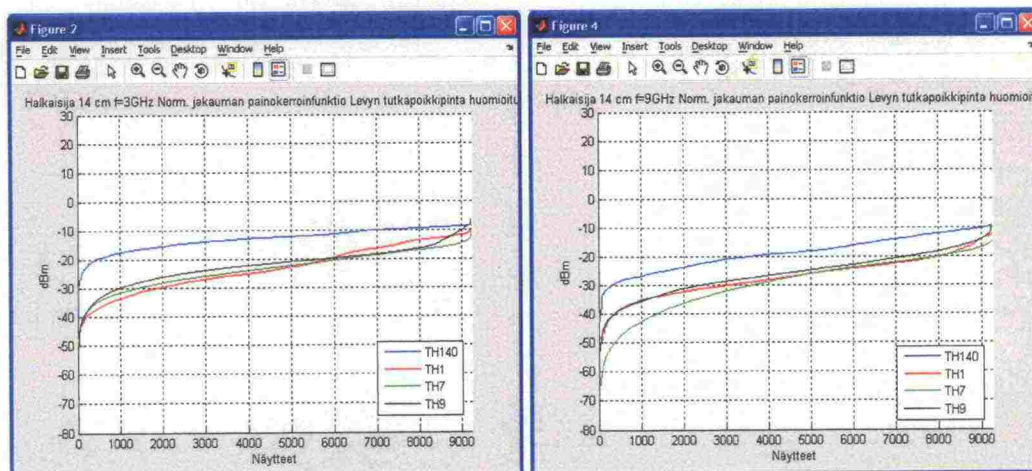
Kuva 27. Analyysissä käytetyt todennäköisyysfunktiot ja niiden painokertoimet pystykulman funktiona.

Eri funktioiden vaikutusta tuloksiin testattiin testilaskennoilla. Tulosten perusteella analyysiin valittiin todennäköisyysfunktioiksi Bell-funktio. Tämän jälkeen analyysilaskennat suoritettiin uudelleen painottamalla sironta-arvoja Bell-todennäköisyysfunktiolla. Vertailun helpottamiseksi samaan tarkasteluryhmään kuuluvien mallien sirontakäyrät piirrettiin samaan kuvaan. Kuvassa sironta-arvot on esitetty lajiteltuna kasvavaan järjestykseen. Kappaleissa 5 ja 6 käytettyä pystykulmakohtaista lajittelua ei enää tarvita, koska pystykulman vaikutus on huomioitu Bell-todennäköisyysfunktiolla.

7.2 Halkaisija 14 cm (TH140, TH1, TH7, TH9)

Kuvassa 28 on esitetty tarkasteluryhmän I sironta-arvot painotettuna eri asentojen todennäköisyyksillä. Tulokset esitetään 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla absoluuttisina ja normalisoituna. Normalisoinnissa on käytetty poikkipinta-alaltaan vastaavan metallilevyn tutkapoikkipinta-alaa.





Kuva 28. Tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot tarkasteluryhmällä I. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Ylhäällä ovat absoluuttiset ja alhaalla normalisoidut tulokset.

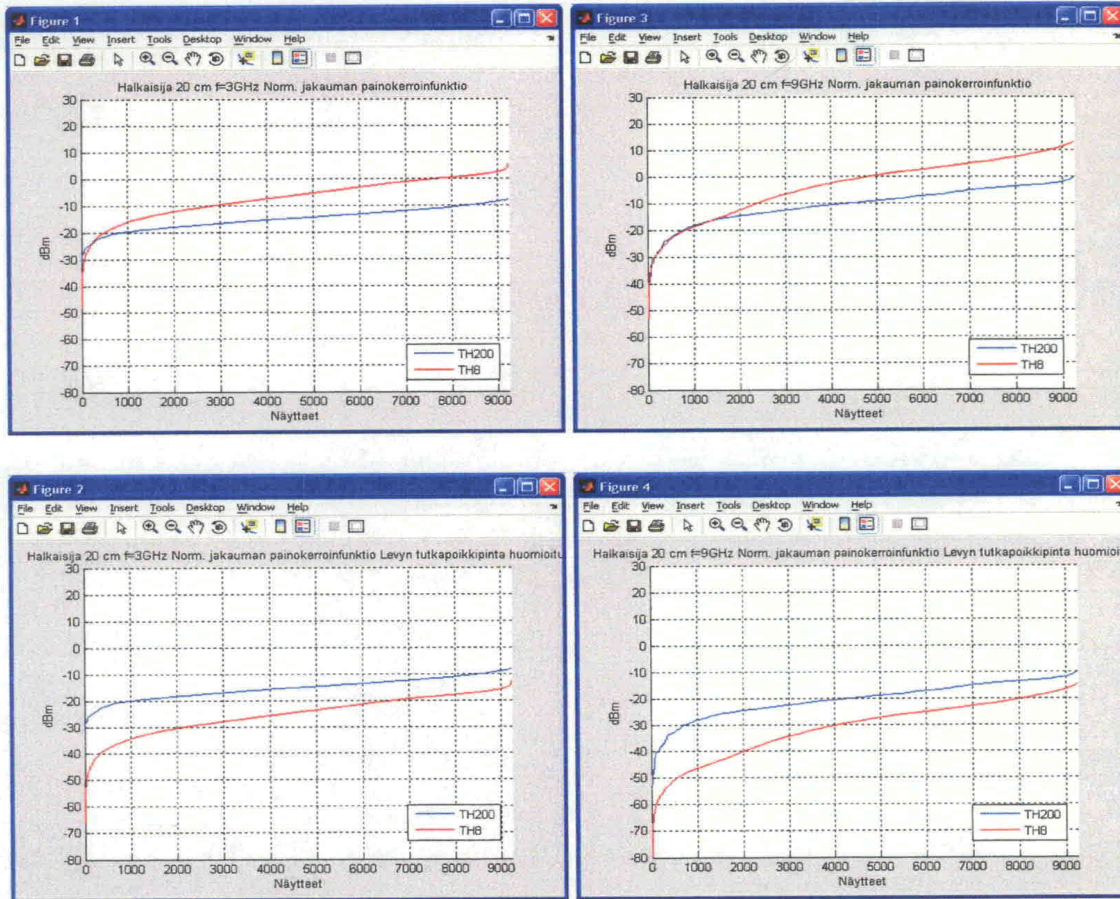
Kun mallien sirontakuviota tarkastellaan 3 GHz:n taajuudella absoluuttisina arvoina, TH7:aa voidaan pitää parhaiten sirottavana, koska sen käyrän alle jäävä pinta-ala on suurin. TH9:n sirontakuviossa on eniten suuria sironta-arvoja, mikä viittaa suurempaan maksimikeilaan käytön kannalta tärkeään suuntaan. Referenssimalli TH140 on tarkasteluryhmän tasaisin sirottaja, koska sen käyrällä on pienin kulmakerroin. Pinta-ala TH140:n käyrän alla on pienin, joten sen keskimääräinen sironta on selvästi muita pienempi. Tuloksista nähdään, että TH1:n sirontakuviosta löytyy eniten pieniä sironta-arvoja.

9 GHz:n taajuudella kaikkien mallien kulmakertoimet kasvavat. Tämä viittaa suurempaan tasovaihteluun. TH1 on pinta-altaan suurin, joten se on malleista sirottavin. TH7:ssä on eniten pieniä sironta-arvoja. Sen sirontaominaisuudet ovat taajuuden kasvaessa heikentyneet ja on todennäköisempää, että siinä esiintyy tutkan kannalta pimeitä alueita. Malleista TH140 on edelleen tasaisimmin sirottava.

Kun tulokset normalisoidaan, TH140 on selkeästi muita malleja parempi. Sillä on molemmilla taajuuksilla selvästi vähiten pieniä sironta-arvoja, sen kulmakerroin on selvästi pienempi ja pinta-ala käyrän alapuolella on selvästi muita suurempi. 3 GHz:n taajuudella TH1:n, TH7:n ja TH9:n erot ovat varsin pieniä ja paremmuusjärjestys riippuu pitkälti siitä, mitä sirontaominaisuutta painotetaan. 9 GHz:n taajuudella TH7:n sirontaominaisuudet heikkenevät selvästi malleihin TH1 ja TH9 verrattuna.

7.3 Halkaisija 20 cm (TH200, TH8)

Kuvassa 29 on esitetty tarkasteluryhmän II sironta-arvot painotettuna eri asentojen todennäköisyyksillä.



Kuva 29. Tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot tarkasteluryhmällä II. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Ylhäällä ovat absoluuttiset ja alhaalla normalisoidut tulokset.

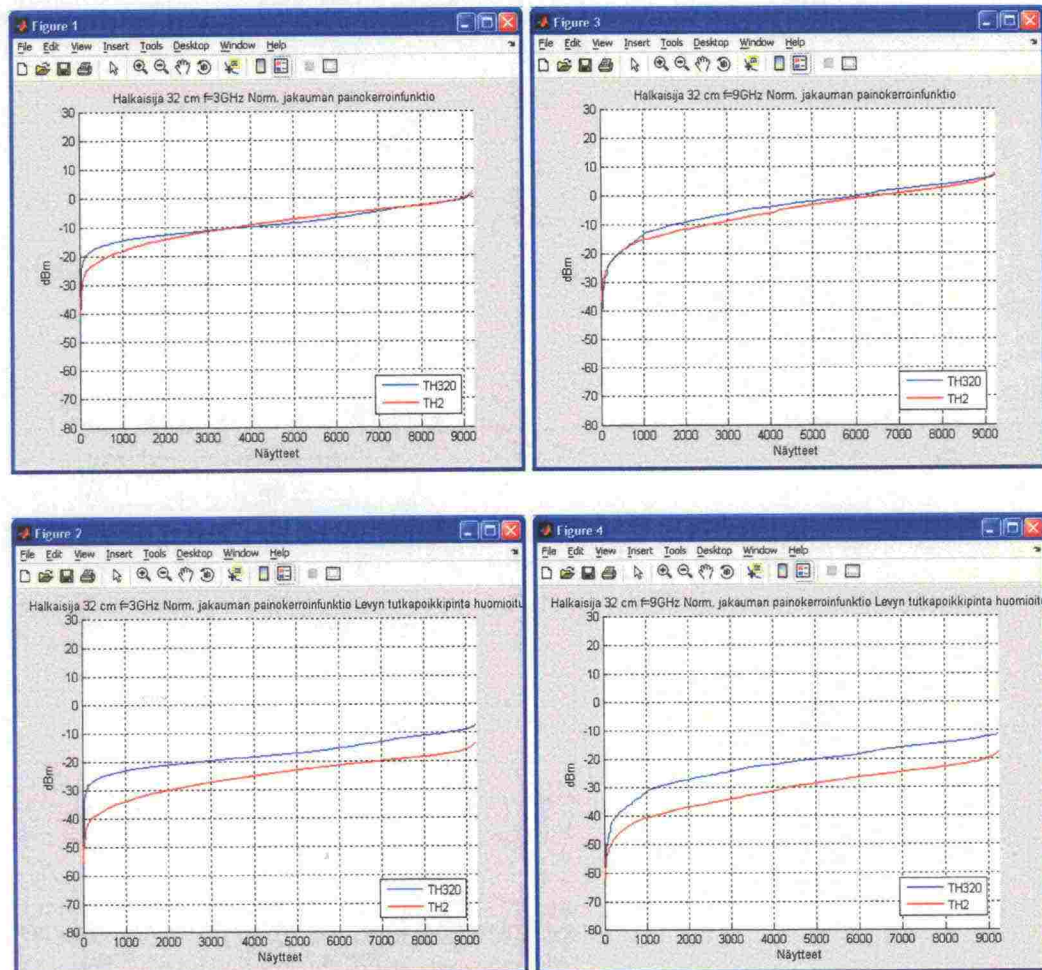
Kun sironta-arvoja vertaillaan absoluuttisina lukuina 3 GHz:n taajuudella, TH8:n sirontakäyrän alle jäävä pinta-ala on selvästi TH200:ta suurempi. Kuvasta kuitenkin näkyy, että TH8:ssa esiintyy voimakkaita minimejä ja maksimeja, mikä on merkki suuresta hajonnasta. TH200:n sirontakäyrän kulmakerroin on selkeästi pienempi, joten sen sirontaominaisuudet ovat tasaisemmat kuin TH8:ssa. TH200:ssa ainoana ongelmana on molemmilla taajuuksilla alhainen maksimi ja keskimääräinen sirontataso.

9 GHz:n taajuudella TH8:ssa näkyy vielä yksittäisiä voimakkaita minimikohtia, mutta mallien väliset erot ovat tasoittuneet pienien sironta-arvojen osalta. TH200:n kulmakerroin on edelleen selkeästi pienempi kuin TH8:n. Erot suurien sironta-arvojen puolella ovat jo merkittävät.

Kun sironta-arvot normalisoidaan, TH200 on kaikilla tarkastelumittareilla parempi kuin TH8. Käyrän alle jäävä pinta-ala on merkittävästi suurempi, kulmakerroin on pienempi, suuria sironta-arvoja esiintyy enemmän ja pieniä vastaavasti vähemmän. Erot kuitenkin tasoittuvat siirryttäessä kohti suuria arvoja. Tästä voidaan päätellä, että TH8:ssa on terävämpi pääkeila molemmilla taajuuksilla. Erot sirontakäyrissä kasvavat 9 GHz:n taajuudella.

7.4 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2)

Kuvassa 30 on esitetty tarkasteluryhmän III sironta-arvot painotettuna eri asentojen todennäköisyyksillä.



Kuva 30. Tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot tarkasteluryhmällä III. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Ylhäällä ovat absoluuttiset ja alhaalla normalisoidut tulokset.

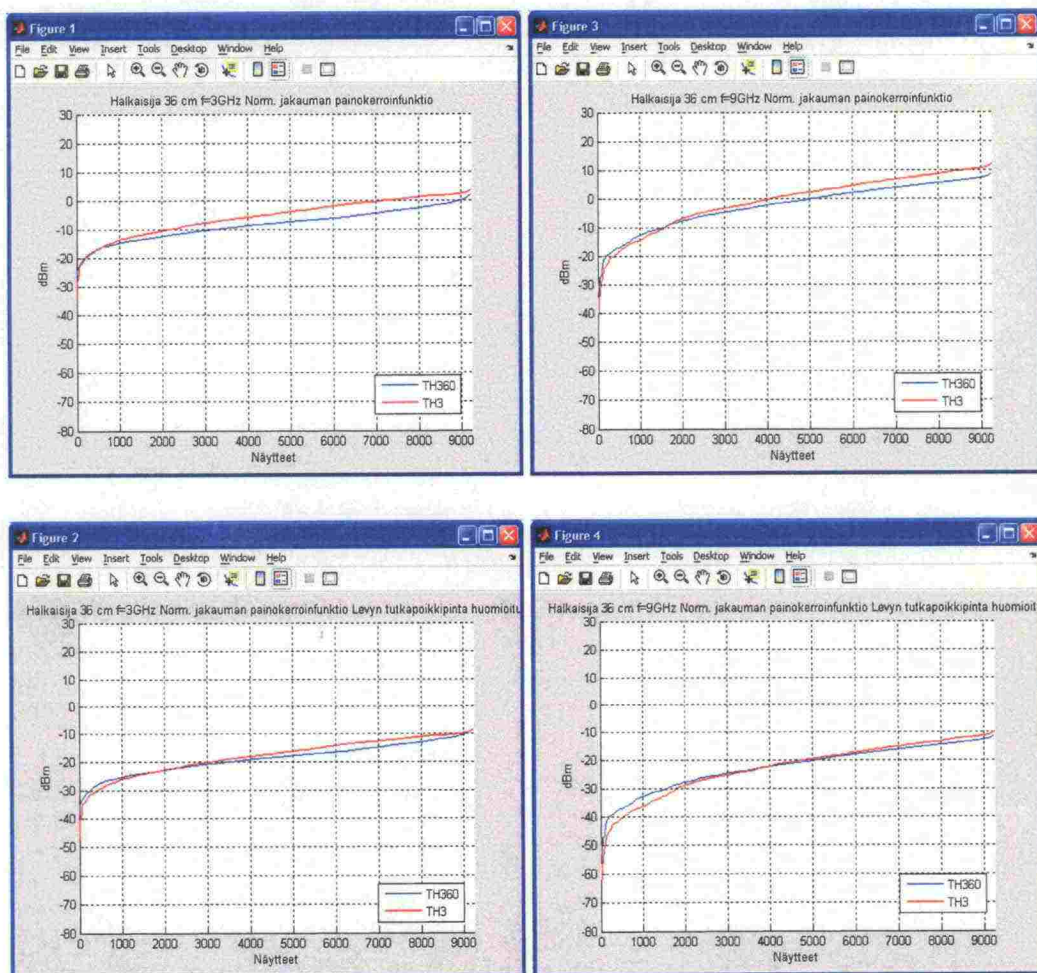
Tuloksista nähdään, että 3 GHz:n taajuudella TH320:n ja TH2:n sirontaominaisuudet ovat hyvin samankaltaiset. TH2:n kulmakerroin on hiukan suurempi, viitaten suurempaan tasovaihteluun. TH2:ssa esiintyy enemmän pieniä sironta-arvoja ja vastaavasti käyrän lopussa näkyy voimakkaampi kaartuminen ylöspäin. Tämä viittaa suurempiin yksittäisiin maksimiarvoihin. 9 GHz:n taajuudella erot tasoittuvat, mutta TH2:n kulmakerroin on edelleen vähän suurempi kuin TH320:ssa. Pinta-ala sirontakäyrän alla on TH320:ssa myös hiukan suurempi kuin TH2:ssa eli sen sirontaominaisuudet ovat lievästi paremmat.

Kun sironta-arvot normalisoidaan, tulee sirontakäyriin suurempia eroja. 3 GHz:n taajuudella TH320:n minimi- ja maksimiarvot ovat suurempia, sirontakäyrän kulmakerroin on pienempi ja pinta-ala käyrän alapuolella on suurempi kuin TH2:ssa. Tämä viittaa parempiin sirontaominaisuuksiin. Mallien minimiarvot ovat samaa

suuruusluokkaa 9 GHz:n taajuudella, mutta heti jo sirontakäyrän alussa TH320:n sironta-arvot kohoavat TH2:n sironta-arvojen yläpuolelle ja tasoero säilyy lähes muuttumattomana käyrän loppuun asti. TH2:ssa on enemmän yksittäisiä maksimi- ja minimiarvoja kuin TH320:ssä. Tämän seurauksena TH2:n sirontakäyrän suunta kääntyy TH320:ä voimakkaammin käyrän alussa (alaspäin) ja lopussa (ylöspäin).

7.5 Halkaisija 36 cm (TH360, TH3)

Kuvassa 31 on esitetty tarkasteluryhmän IV sironta-arvot painotettuna eri asentojen todennäköisyyksillä.



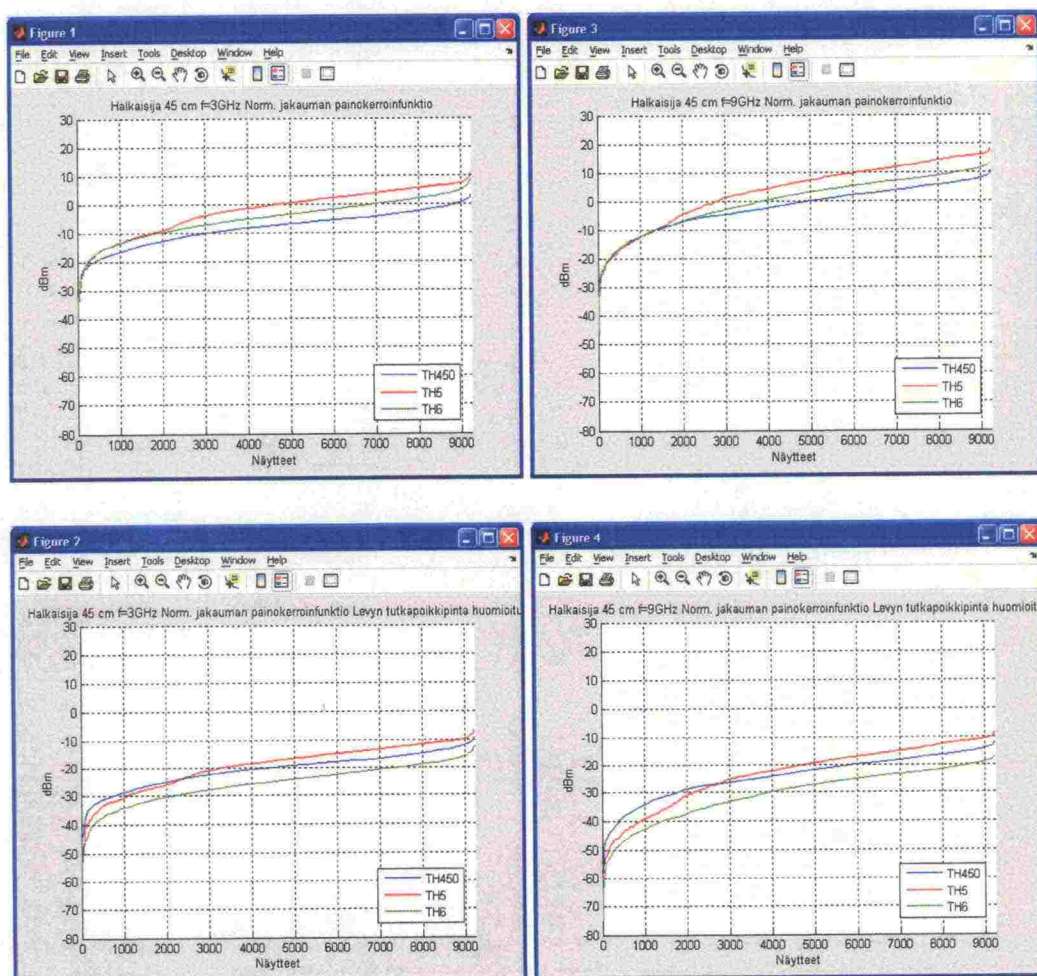
Kuva 31. Tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot tarkasteluryhmällä IV. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Ylhäällä ovat absoluuttiset ja alhaalla normalisoidut tulokset.

Mallien TH3 ja TH360 käyrät ovat hyvin samanlaiset. 3 GHz:n taajuudella TH3:ssa esiintyy suurempia minimiarvoja kuin TH360:ssä. TH3:n sirontakäyrän alle jäävä pinta-ala on hiukan suurempi kuin TH360:ssä, joten sen sirontaominaisuudet ovat lievästi paremmat. TH3:ssa sirontakäyrä on hiukan kuperampi ja kulmakerroin suurempi kuin TH360:ssä molemmilla taajuuksilla.

Kun sironta-arvot normalisoidaan, erot mallien välillä pienenevät. Merkittävin ero on, että TH3:ssa on enemmän pieniä ja suuria sironta-arvoja kuin TH360:ssa. Tämä viittaa suurempaan tasovaihteluun. Kuvassa pienet erot näkyvät molemmilla taajuuksilla.

7.6 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6)

Kuvassa 32 on esitetty tarkasteluryhmän V sironta-arvot painotettuna eri asentojen todennäköisyyksillä.



Kuva 32. Tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot tarkasteluryhmällä V. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksilla. Ylhäällä ovat absoluuttiset ja alhaalla normalisoidut tulokset.

Kuvista nähdään, että keskimääräinen sironta on TH5:ssa suurin molemmilla taajuuksilla ja TH450:ssa matalin. Sirontakäyristä voidaan päätellä, että TH450:n ja TH6:n sirontakuviot ovat hyvin samanlaiset, mutta TH6:n keskimääräinen sirontataso on hiukan korkeampi kuin TH450:n molemmilla taajuuksilla. TH6:ssa on voimakkaita yksittäisiä minimejä, joita esiintyy molemmilla taajuuksilla. 3 GHz:n taajuudella TH6:n sirontakäyrä nousee kuitenkin lähes heti TH450:n yläpuolelle ja pysyy siellä loppuun asti. 9 GHz:n taajuudella vastaava ohitus tapahtuu likimain 2000 näytteen kohdalla.

TH5:n sirontakäyrä on aluksi samaa tasoa TH6:n ja TH450:n kanssa, kunnes kappaleessa 6.5 mainittu askelmainen kasvu sirontakuviossa nostaa sen selvästi muiden yläpuolelle. 3 GHz:n taajuudella tämä arvojen kohoaminen alkaa 2000 näytteen kohdalla ja 9 GHz:n taajuudella hiukan aikaisemmin.

Kun tulokset normalisoidaan, TH5:n keskimääräinen sironta on edelleen suurin ja TH450:llä tasaisin. TH450:llä on vähiten heikkoja sironta-arvoja molemmilla taajuuksilla. Normalisoinnin jälkeen TH450:n ja TH6:n paremmuusjärjestys vaihtuu. TH6 on heikoin molemmilla taajuuksilla. TH5:ssä näkyy edelleen sironta-arvojen askelmainen kasvu. Muutoin sirontakäyrien muodot ovat hyvin samanlaiset molemmilla taajuuksilla.

8 Tilastollisten tunnuslukujen määrittely

Analyysin viimeinen vaihe oli etsiä tapaa esittää tutkaheijastinmallien tulokset tunnuslukujen muodossa. Vertailun kannalta merkittävimmät tilastolliset suureet ovat keskiarvo, keskihajonta ja maksimi. Tilastollisten tunnuslukujen laskennasta on rajattu pois käytön kannalta merkityksettömät suunnat tarkastelualueen rajauksella (väli 40° - 140°) ja nopeat tasovaihtelut keskiarvoistuksella (3x3 liukuva keskiarvoistusmatriisi). Tutkaheijastimen eri asentojen vaikutus on huomioitu Bell-todennäköisyysfunktioilla.

8.1 Keskiarvo, keskihajonta ja maksimi

Taulukossa 9 on esitetty tutkaheijastinkohtaiset keskiarvot, keskihajonnat ja maksimit 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa. Taulukossa ei esitetä minimiarvoja, koska se ei ole mielekäästä käytettäessä normaalijakaumaa eri asentojen todennäköisyyksien painottamisessa. Sironta-aryot ovat painotettuja eikä niistä voida päätellä, onko kyse lähellä vaakatasoa olevista pienistä arvoista, joita on painotettu suurella painokertoimella vai kauempana vaakatasosta olevista suurista sironta-arvoista, joita on painotettu pienellä painokertoimella.

Taulukossa punaisella värillä on esitetty ne tapaukset, missä referenssimalli on ollut paras, ja sinisellä värillä ne, missä viitoissa käytetty malli on ollut paras.

Taulukko 9. Tutkaheijastinmallien keskiarvot, keskihajonnat ja maksimit.

Ryhmä I TH140	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
	-16,1	-10,6	-20,6	-12,6	-14,4	-6,0
TH1	-9,1	-4,2	-10,2	-7,3	-3,4	0,4
TH7	-7,1	-0,9	-9,7	-2,1	-0,9	5,9
TH9	-7,7	-1,3	-8,2	-3,0	1,3	6,6

Ryhmä II TH200	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
	-12,0	-5,9	-15,6	-8,2	-8,2	-0,8
TH8	-1,9	5,1	-4,5	4,7	3,5	12,5
Ryhmä III TH320	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
	-4,8	1,3	-6,7	-0,5	0,4	6,0
TH2	-4,5	0,3	-6,7	-3,4	1,0	4,1
Ryhmä IV TH360	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
	-4,3	3,2	-6,4	1,2	1,4	7,8
TH3	-1,0	6,2	-3,5	4,5	2,9	11,2
Ryhmä V TH450	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
	-4,0	3,4	-6,4	1,5	2,1	9,0
TH5	3,5	11,3	1,4	9,9	9,2	16,2
TH6	0,1	6,6	-2,5	3,9	6,4	11,6

Tarkasteluryhmässä I tilastollisissa tunnusluvuissa on merkittäviä keskinäisiä eroja mallien välillä. Referenssimallilla TH140 on selkeästi alin keskiarvo ja maksimi. Sen hajonta on pienin molemmilla taajuuksilla. Tuloksista voidaan päätellä, että mallin poikkipinta-alalla on merkittävä vaikutus keskiarvoon. Maksimi- ja keskihajonta-arvoon voidaan vaikuttaa soppien koolla, sijoittelulla ja suuntauksella.

Tarkasteluryhmässä II erot referenssimallin TH200 ja käytössä olevan mallin TH8 välillä ovat isot johtuen suuresta kokoerosta. Referenssimallin korkeus on vain 14,5 cm ja TH8:n 113 cm. Tämä selittää erot keski- ja maksimi-arvoissa. Optimaalisempi soppirakenne, suuntaus ja asettelu eivät riitä korjaamaan eroa. Hajonta-arvo on TH200:ssa molemmilla taajuuksilla selvästi pienempi.

Tarkasteluryhmässä III erot referenssimallin ja käytössä olevan mallin välillä alkavat tasoittua. Mallien kokoero on pienempi kuin tarkasteluryhmissä I ja II. Tuloksista nähdään, että TH320 toimii paremmin 9 GHz:n ja TH2 3 GHz:n taajuudella. Erot ovat hyvin pieniä 3 GHz:n taajuudella. Ne kasvavat merkittäviksi vasta 9 GHz:n tapauksessa referenssimallin eduksi.

Tarkasteluryhmässä IV referenssimalli TH360 ja TH3 ovat rakenteeltaan ja kooltaan samanlaiset, joten erot tilastollisissa arvoissa ovat pieniä. Koska TH3 on hiukan korkeampi, ovat sen sironta-arvot myös suurempia. Tämä selittää sen, miksi keski- ja maksimi-arvo ovat siinä suurempia kuin TH360:ssä. Hajonta on TH360:ssä pienempi. Tämä johtune soppien optimaalisemmasta muotoilusta ja suuntauksesta.

Tarkasteluryhmässä V TH5:lla on molemmilla taajuuksilla suurin keskiarvo ja maksimi, vaikka TH6 on heijastinmalleista kookkain. Tämä johtuu siitä, että sopet ovat TH6:ssa useammassa kerroksessa aiheuttaen sirontakuvion liuskoittumista. Soppien koko on myös pienempi kuin TH5:ssa ja kaikissa sopeissa on kärki asetettu ylöspäin. TH5:n korkeampi keski- ja maksimi-arvo johtuvat siitä, että TH5:n poikkipinta-ala ja soppikoko on suurempi kuin TH450:n. Lisäksi TH450:een on mallinnettu läpivienti paristoputkelle, mikä pienentää käytössä olevaa soppikokoa. TH450:ssä soppien väliin jää myös pieniä aukkoja, jotka heikentävät sirontaominaisuuksia. Referenssimallissa keskihajonta on pienin, mikä viittaa optimaalisempaan soppimuotoiluun ja suuntaukseen.

Liitteessä A tunnusluvut on esitetty käyttäen poikkipinta-alalla normalisoituja sironta-arvoja.

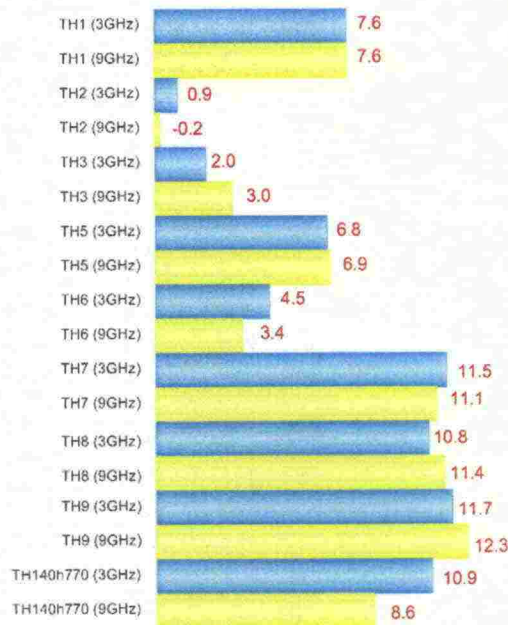
8.2 Tilastollisten tunnuslukujen yhdistäminen

Taulukon 9 perusteella tutkaheijastimien keskinäinen vertailu on varsin työlästä. Yleiskuvan saamiseksi tilastolliset tunnusluvut voidaan yhdistää yhdeksi tunnusluvuksi. Sen tulisi suosia tutkaheijastinmalleja, joilla ympärisironta on suurin ja tasaisin, ja sakottaa niitä, joissa tasovaihtelut ovat suuria. Tähän perustuen kehitettiin yksinkertainen kaava, jossa keskiarvo ja maksimi on sijoitettu osoittajaan ja keskihajonta nimittäjään. Jotta tunnusluvut olisivat vertailukelpoisia, on tilastolliset tunnusluvut normalisoitava vastaavan referenssimallin tunnusluvuilla. Tunnusluvun β laskentakaava on

$$\beta = \frac{\frac{\bar{x}}{\bar{x}_{ref}} \cdot \frac{\hat{x}}{\hat{x}_{ref}}}{\frac{\delta}{\delta_{ref}}}, \quad (3)$$

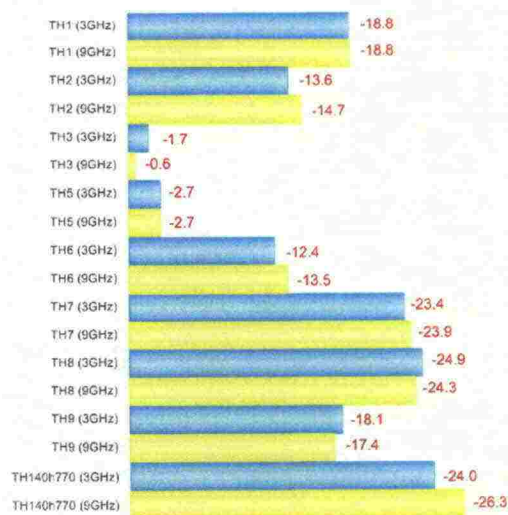
missä \bar{x} on keskiarvo, \hat{x} maksimi-arvo ja δ keskihajonta. Luvut kaavassa ovat lineaarimuodossa. Kaavassa 3 tilastomuuttujia painotetaan yhtä paljon (kerroin on 1). Painotuksessa voitaisiin käyttää eri kertoimia riippuen tutkaheijastimen käyttökohteesta. Tästä johtuen tilastoarvot on esitetty taulukossa 9 kappaleessa 8.1 erikseen.

Kuvassa 33 tunnusluvut on esitetty molemmilla taajuuksilla desibelilukuna, jolloin negatiiviset arvot kertovat, että käytössä olevan tutkaheijastinmallin sirontaominaisuudet ovat heikommat kuin vastaavan referenssimallin ja positiiviset taas toisinpäin. Koska käytössä olevat tutkaheijastinmallit olivat kookkaampia kuin vastaavat referenssimallit, kertoimet ovat positiivisia. Poikkeuksena on ainoastaan TH2:n kerroin 9 GHz:n taajuudella.



Kuva 33. Viitoissa käytettyjen tutkaheijastinmallien tunnushuvut 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuudella.

Kuvan perusteella vaikuttaisi siltä, että tutkaheijastinmalli TH9 on paras molemmilla taajuuksilla. Päätelmä pätee ainoastaan tarkasteluryhmän I osalta. TH9 saa suuren tunnushukuarvon, koska sen keski- ja maksimiarvo ovat selkeästi referenssimallia TH140 korkeammat. Erot referenssimallien ja viitoissa käytettyjen mallien välillä pienenevät, kun heijastimen halkaisijaa kasvatetaan. Tästä johtuen TH5 saa suhteellisen alhaisen tunnushukuarvon. Mielekkäämpi kuva tilanteesta saadaan, kun käytetään normalisoituja arvoja. Tällöin eri tarkasteluryhmään kuuluvat mallit on yhteismitallistettu. Kuvassa 34 on esitetty normalisoidut tunnushukuarvot



Kuva 34. Viitoissa käytettyjen tutkaheijastinmallien normalisoidut tunnushuvut 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuudella.

Kuvassa 34 tunnusluvut on esitetty desibelilukuina. Mitä lähempänä arvo on nollaa, sitä parempi on sen sirontaominaisuus. Arvo nolla vastaa referenssimallin tunnuslukua eli mikään käytössä olevista malleista ei toimi paremmin kuin vastaava referenssimalli, jos koon vaikutus sironta-arvoista on poistettu. Tulosten perusteella TH3 on paras malli molemmilla taajuuksilla. Tuloksista voidaan päätellä, että ne tutkaheijastinmallit, joissa sopet ovat yhdessä kerroksessa, soppien kärjet vuorotellen ylös- ja alaspäin ja tutkaheijastimen muoto lähes kuutio, pärjäävät vertailussa parhaiten. Heikoiten vertailussa pärjäävät mallit, joissa yksittäiset sopet ovat eri kerroksissa. Tämä johtunee siitä, että näissä malleissa leveyden ja korkeuden suhde tai soppikoko ei ole tutkapoikkipinta-alan kannalta optimaalisin. Mallit, joissa sopet on asetettu moneen kerrokseen, toimivat selvästi heikommin verrattuna malleihin, joissa sopet ovat samassa kerroksessa, vaikka mallin poikkipinta-ala olisi samaa luokkaa. Kuvassa on esitetty lisäksi malli TH140h770, joka on korkeuden suhteen skaalattu referenssimalli TH140. Sen sirontaominaisuuksia on tarkemmin kuvattu liitteessä B.

9 Yhteenveto

Tutkimushankkeen aikana luotiin referenssimallit eri halkaisijamittaa oleville tutkaheijastimille, suoritettiin syvälinen tarkastelu referenssimalleilla ja käytössä olevilla tutkaheijastinmalleilla, tehtiin kattavampi ja systemaattisempi tutkaheijastinmallien vertailu, kehiteltiin yksikäsitteinen tunnusluku tutkaheijastimien vertailuun ja analysointiin sen soveltuvuutta.

Referenssimallien pohjana hyödynnettiin edellisen tutkimushankkeen tuloksia. Referenssimallien toteutuksessa käytettiin optimaalista soppimuotoa ja sopet asennettiin tutkaheijastimeen yhteen kerrokseen. Referenssimallien ja käytössä olevien mallien sirontaominaisuuksia tutkittiin laskemalla kaikille malleille sirontarasteri yli koko suunta-avaruuden. Sirontarastereiden vertailu toi selkeästi esille sen, että heijastimen geometrinen poikkipinta-ala vaikuttaa merkittävästi tutkaheijastimen sirontatasoon. Mitä suurempi se on, sitä korkeampi keskimääräinen sirontataso on. Sirontatasoon voidaan vaikuttaa myös käyttämällä mahdollisimman suurikokoisia soppeja. Sirontarastereiden analysoinnista kävi myös ilmi, että asettamalla sopet vuorotellen kärki ylös- ja alaspäin saavutetaan symmetrinen sirontakuvio, mikä paremmin sietää tutkaheijastimen kallistusta eteen- ja taaksepäin. Sirontakuvion hajontaan voidaan vaikuttaa soppien muotoilulla ja suuntauksella. Optimaalisen soppirakenteen käyttö on ongelmallista, koska optimaalisten soppien asettelu vaatii lähes kuutiomaisen tilan. Tämä on hankalaa tutkaheijastinmalleissa, joissa halkaisija on pieni tai malliin on varattava tilaa paristoputken läpiviennille. Näissä tapauksissa on todennäköisesti turvauduttava sopen venyttämiseen. Sitä ei voi kuitenkaan tehdä rajattomasti, koska venytys muuttaa jyrkästi sopin sirontaominaisuuksia kuten tutkaheijastinmalli TH140h770:n tapauksessa nähtiin.

Tutkaheijastimien välinen vertailu tehtiin käyttäen tilastollisia suureita. Niistä soveltuvimmiksi havaittiin maksimi, keskiarvo ja keskihajonta. Näiden suureiden avulla voidaan vertailla tutkaheijastimen eri sirontaominaisuuksia. Vertailuvaiheen päätteeksi kehitettiin yksikäsitteinen tunnusluku tutkaheijastimien vertailuun.

Tunnusluvun todentaminen toi esille selviä ongelmia. Ensiksikin tunnusluvulla voidaan vertailla vain halkaisijaltaan samankokoisia heijastinmalleja. Toiseksi, tunnusluku on vain suuntaa-antava. Syvällisempi vertailu vaatii sirontarasterin, sirontakuvion ja tilastollisten tunnuslukujen vertailun ja jopa mittausten suorittamisen.

Kun tutkimuksen aikana kehitettyjen referenssimallien tuloksia vertaillaan käytössä oleviin, on selvää, että kehitetty referenssimalli soveltuu vain suuriin heijastinmalleihin. Pienet heijastinmallit on toteutettava jollakin toisella tavalla esimerkiksi venyttämällä tai kerrostamalla soppeja päällekkäin.

Tutkimuksessa on käytetty VTT:llä kehitettyä tutkapoikkipinnan laskentaohjelmistoa, joka on ensisijaisesti kehitetty suurien mallien laskentaan. Laskentaohjelmiston käyttämät laskentamenetelmät ovat approksitiivisia, joten ohjelman antamia tuloksia ei tule pitää absoluuttisina. Laskentaohjelmiston käyttö on kuitenkin halpa tapa testata erilaisia tutkaheijastinmalliratkaisuja ilman prototyyppien tekoa ja kalliita mittaussjärjestelmiä. Laskentaohjelmiston etuna ulkona tehtyihin mittauksiin on sen toistettavuus ja mahdollisuus poistaa ympäristön vaikutus tuloksista.

Tutkimus on edennyt siihen pisteeseen, että mittausten teko yhdellä tai useammalla tutkaheijastinmallilla radiokaiuttomassa huoneessa olisi tarpeellista. Sen avulla voitaisiin todentaa laskentaohjelmistolla saadut tulokset. Tutkimustuloksia on hyvä myös verrata ulkona oikeassa ympäristössä tehtyihin mittauksiin, koska se vastaa todellisuutta. Ympäristön vaikutusta laskentatuloksiin ja radiokaiuttomassa huoneessa tehtyihin mittauksiin voidaan mallintaa lähteissä [5] ja [6] esitetyillä menetelmillä. Ne ovat varsin suoraviivaisia toteuttaa. Radiokaiuttomassa huoneessa tehtäviä mittauksia varten tutkapoikkipinnan laskentaohjelmistolla on laskettu referenssitulokset kalibrointi-kappaleena käytettävälle pallolle. Tulokset on tarkemmin esitetty liitteessä C.

Lähdeluettelo

- [1] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Toivanen, H., Horsmanheimo, S., Tutkaheijastimien analysointi, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 3.9. 2004, 39 s.
- [2] <http://www.vtt.fi/tte/tte35/rcs.html>
- [3] Vaskelainen, L., Suuren kolmioelementin RCS fysikaalisen optiikan menetelmällä, VTT Tietotekniikka 1998, 11 s.
- [4] Hujanen, A., Sten, J., Diffraktiomallit RCS-laskennassa – Fysikaalisen diffraktio-teorian testaus, VTT Tietotekniikka 10.8.1999, 30 s.
- [5] Knott, E.F., Radar Cross Section, 1993.
- [6] Long, M.W., Radar Reflectivity of Land and Sea, 3 painos.

Liite A: Normalisoidut tunnusluvut

Laskentatulosten vertailun aikana havaittiin, että tutkaheijastimen koko vaikuttaa eniten tutkapoikkipinta-alaan, joten heijastimen suuren koon tuomia sirontaetuja ei voida soppien koolla, muodolla tai suuntauksella korjata. Näiden tekijöiden vaikutusta voidaan tutkia normalisoimalla tutkaheijastinmallien tutkapoikkipinta-alat vastaavan metallilevyn tutkapoikkipinta-alalla. Koska keskihajonta ei riipu poikkipinta-alasta samalla tavalla kuin keskiarvo ja maksimi, on se jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Tutkaheijastinkohtaiset tilastolliset tunnusluvut laskettuna normalisoiduista sironta-arvoista on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Normalisoidut tilastolliset tunnusluvut.

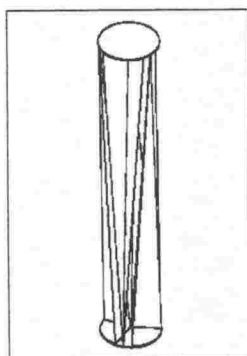
Ryhmä I TH140	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz -10,3	9 GHz -14,3	3 GHz -8,6	9 GHz -9,7
TH1	-16,5	-21,1	-10,7	-16,5
TH7	-18,8	-22,1	-12,6	-15,3
TH9	-16,7	-19,9	-7,8	-12,0
Ryhmä II TH200	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz -12,2	9 GHz -15,7	3 GHz -8,5	9 GHz -10,6
TH8	-19,9	-22,5	-14,5	-15,1
Ryhmä III TH320	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz -13,2	9 GHz -16,5	3 GHz -7,9	9 GHz -11,9
TH2	-20,1	-24,8	-14,6	-21,1
Ryhmä IV TH360	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz -14,7	9 GHz -16,7	3 GHz -9,1	9 GHz -12,1
TH3	-13,2	-15,6	-9,3	-10,6
Ryhmä V TH450	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz

	-16,4	-18,5	-10,2	-12,9
TH5	-13,7	-15,3	-7,9	-10,4
TH6	-20,7	-23,8	-14,5	-18,8

Taulukosta 10 nähdään, tutkaheijastinmalli, jossa kaikki sopet ovat samassa kerroksessa, antaa selvästi suurimman tutkapoikkipinta-alan suhteessa kokoon. Tarkasteluryhmissä I, II ja III referenssimalleilla on pääsääntöisesti suurimmat keskiarvot ja maksimit. Poikkeuksena on ainoastaan TH9 vertailuryhmässä I, missä 3 GHz:n taajuudella TH9:n maksimiarvo on suurin. Suurimmat erot referenssimallien ja viitoissa käytettyjen tutkaheijastinmallien välillä ovat ryhmissä I - III. Tarkasteluryhmässä IV referenssimalli TH360 ja TH3 ovat rakenteeltaan samankaltaisia, joten niiden keskiarvot ja maksimit ovat lähellä toisiaan. TH3:lla on hiukan korkeampi keskiarvo molemmilla taajuuksilla ja maksimiarvo 9 GHz:n taajuudella. Ryhmässä V paras malli on TH5 sekä keskiarvon että maksimin suhteen. Tämä johtuu siitä, että TH5:ssä on käytetty suurempaa soppikokoa. Siihen ei ole tarvittu mallintaa paristoputken läpivientä. Lisäksi TH450:ssä esiintyy mitoitusesta johtuen aukkoja soppien välissä heikentämässä mallin sirontaominaisuuksia.

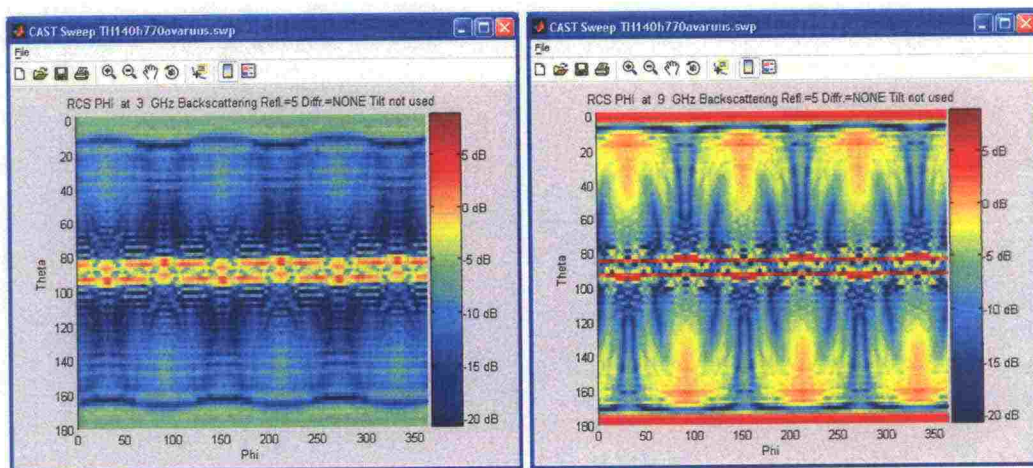
Liite B: Venytetty TH140-malli

Referenssimallista TH140 tehtiin versio, jossa alkuperäistä TH140 mallia venytettiin korkeussuunnassa suuremman poikkipinta-alan ja sitä kautta suuremman tutkapoikkipinta-alan saamiseksi. Venytetyn mallin halkaisija on 14 cm ja korkeus on 77 cm. CAD-kuva mallista on esitetty kuvassa 35 ja siitä käytetään jatkossa nimeä TH140h770.



Kuva 35. CAD-malli tutkaheijastinmallista TH140h770.

Kuvasta näkyy, että soppien muoto poikkeaa hyvin paljon optimaalisesta. TH140h770:n sirontarasterit on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36. TH140h770 mallin sirontarasterit. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Raja-arvot ovat 9,0 dB ja -21,0 dB.

Venytyksestä johtuen soppien normaalit osoittavat voimakkaasti viistoon, mikä näkyy sirontarastereissa soppien synnyttämien kuvioden siirtymisestä pois vaakatasosta. Soppien synnyttämät maksimiarvot sijaitsevat pystykulma-alueilla 10°-40° ja 140°-170°. Mielenkiintoista kuvassa on se, että sirontakuvioon muodostuu kaksi voimakasta, mutta hyvin kapeaa pääkeilaa. Niiden vierellä sirontataso putoaa hyvin jyrkästi ja alkaa sitten hitaasti kasvaa siirryttäessä kohti pieniä ja suuria pystykulmia.

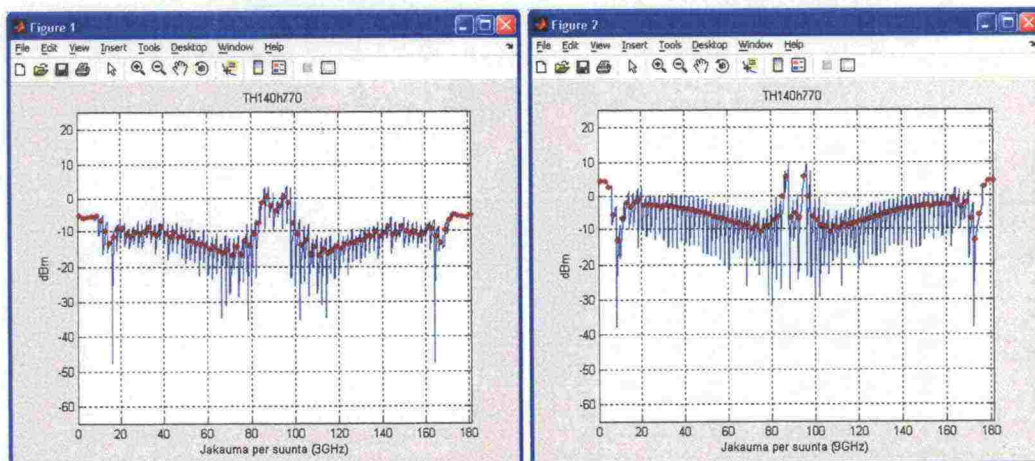
Taulukossa 1 on esitetty tarkasteluryhmään I kuuluvat mallit, niiden korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

Taulukko 11. TH140:n, TH1:n, TH7:n, TH9:n ja TH140h770:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

	TH140	TH1	TH7	TH9	TH140h770
Korkeus [cm]	10,30	47,00	77,00	57,00	77,00
Suhteellinen	1,00	4,56	7,48	5,53	7,48
(3 GHz) [dB]					
Sirontataso	-12,91	-9,23	-9,34	-10,46	-8,38
Suhteellinen	1,00	2,33	2,28	1,76	2,84
(9GHz) [dB]					
Sirontataso	-7,41	-4,69	-4,11	-4,39	-2,76
Suhteellinen	1,00	1,87	2,14	2,00	2,92

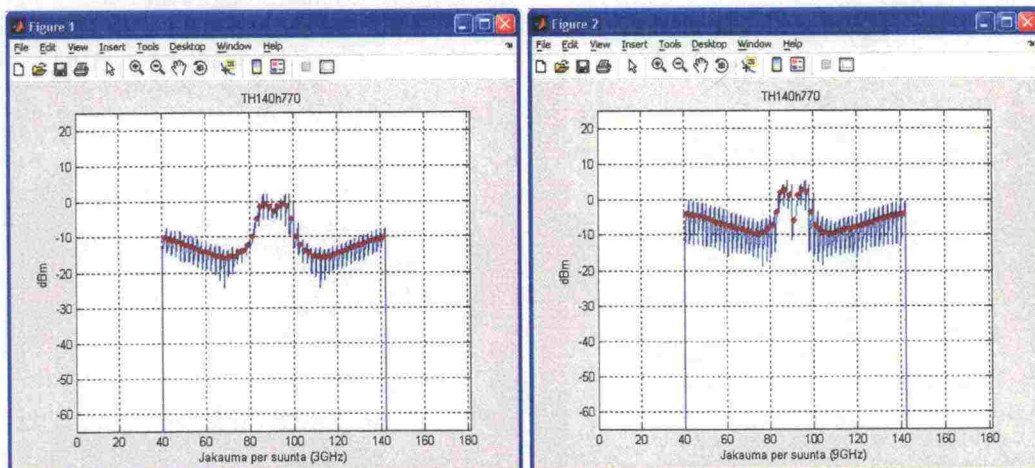
Korkeuden venyttäminen parantaa TH140h770:n sirontaominaisuuksia. Mallin poikkipinta-ala kasvaa 7,48-kertaiseksi ja tutkapoikkipinta-ala 2,84-kertaiseksi verrattuna referenssimalliin TH140. TH140h770:lla on korkein keskimääräinen sirontataso molemmilla taajuuksilla.

Kuvassa 37 on esitetty TH140h770:n sirontakuviot 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla.



Kuva 37. Sirontakuviot mallille TH140h770. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

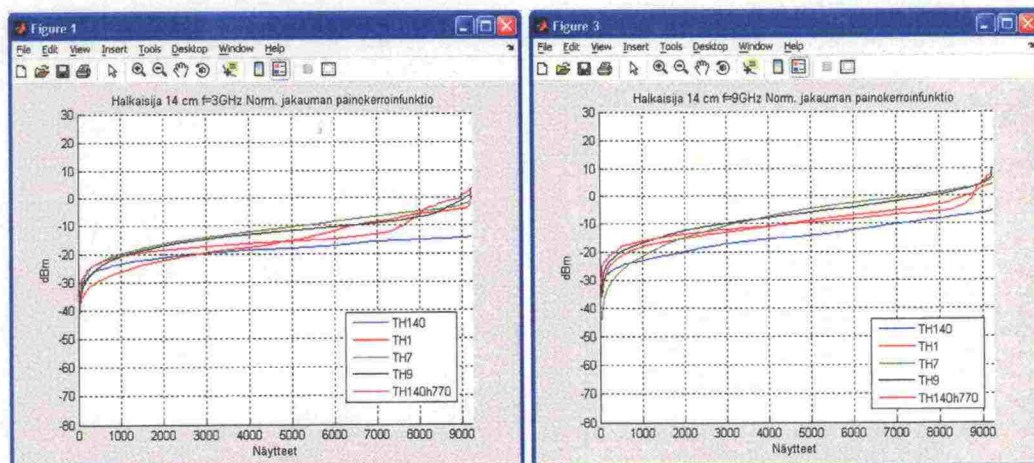
3 GHz:n taajuudella TH140h770:n sirontakuviossa esiintyy kaksihuippuinen kapea pääkeila suuntaan 90°. Keilan ympärillä on matalatasoinen alue, jossa hajonta on suuri. Sironta-arvot viistossa olevien soppien ansiosta siirryttäessä kohti tarkastelualueen reunoja. 9 GHz:n taajuudella pääkeila on jakautunut kahteen erittäin kapeaan osaan. Hajonta on selvästi kasvanut 3 GHz:n tapauksesta ja se on likimain vakio koko tarkastelualueella. Kuvassa 38 on esitetty sirontakuviot tarkasteluvälin rajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen.

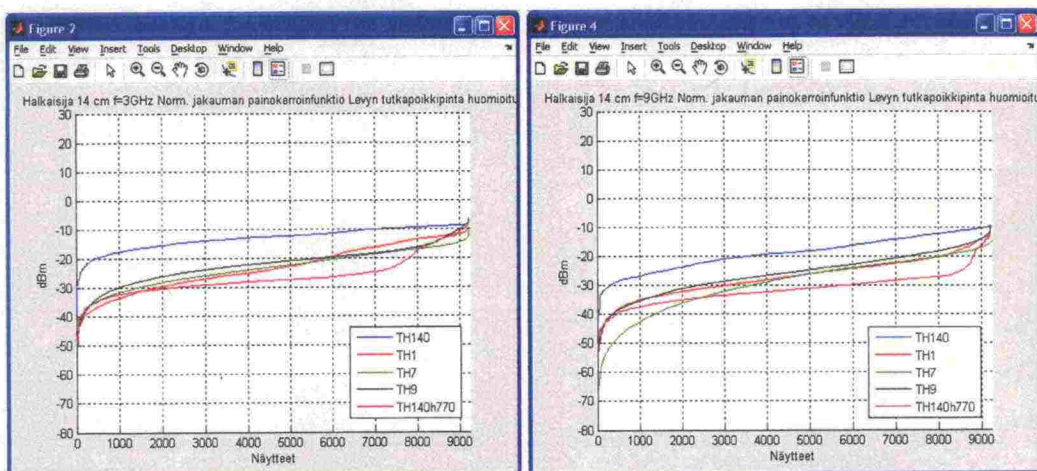


Kuva 38. Keskiarvoistetut sirontakuviot mallille TH140h770. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Kuvasta nähdään, että hajonta 3GHz:n taajuudella lähellä vaakatasoa on pientä, mutta se kasvaa siirryttäessä tarkastelualueen reunoja kohti. Suurin hajonta on sirontakuvioiden minimikohdissa. 9 GHz:n taajuudella sirontakuviosta erottuu kaksi keilaa. Hajonta koko tarkasteluvälillä on lähes vakio.

Kuvassa 39 on esitetty tarkasteluryhmän I tutkaheijastinmallit mukaan lukien TH140h770. Kuvassa esitetään mallien sirontakäyrät painotettuna tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyyksillä.





Kuva 39. Tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot tarkasteluryhmän I tapauksessa. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Ylhäällä absoluuttiset arvot ja alhaalla poikkipinta-alalla normalisoidut.

Kuvan 39 sirontakäyristä näkyy mielenkiintoinen seikka. Venytetyn tutkaheijastinmallin sirontaominaisuudet ovat vain hiukan alkuperäistä mallia paremmat. Sirontakäyrän lopussa tapahtuu voimakas käyrän kääntyminen ylöspäin, mikä on merkki kapeasta, mutta voimakkaasta pääkeilasta. 9 GHz:n taajuudella ero referenssimallin TH140 ja TH140h770:n on suurempi ja vastaavanlainen käyrän kääntyminen voimakkaasti ylöspäin on myös nähtävissä. Kun suuntapainotus huomioidaan, on TH140h770 huonompi ympärisirontaominaisuuksiltaan kuin TH7 ja TH9. Se on malleista selvästi suuntaavin.

Kun samansuuruisen levyn tutkapoikkipinta huomioidaan, TH140h770:n sirontaominaisuudet ovat selvästi muita malleja heikommat. Mallin etuna on se, että siinä on hyvin vähän heikkoja sironta-arvoja ja voimakkaat arvot ovat muiden heijastimien tasoa. Ongelmana ovat keskivaiheen arvot, jotka ovat selvästi muita malleja alhaisemmat.

Taulukossa 12 on ryhmään I kuuluvien tutkaheijastimien keskiarvot, keskihajonnat ja maksimit. Laskennassa heijastimen eri asentojen todennäköisyys on otettu huomioon painottamalla arvoja Bell-funktiolla.

Taulukko 12. Keskiarvot, keskihajonnat ja maksimit

Ryhmä I TH140	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
	-16,1	-10,6	-20,6	-12,6	-14,4	-6,0
TH1	-9,1	-4,2	-10,2	-7,3	-3,4	0,4
TH7	-7,1	-0,9	-9,7	-2,1	-0,9	5,9
TH9	-7,7	-1,3	-8,2	-3,0	1,3	6,6
TH140h770	-7,2	-3,7	-6,2	-3,1	2,0	5,2

Taulukosta nähdään, että TH140h770:n keskiarvo 3 GHz:n taajuudella on TH7:n luokkaa. Keskiarvo kuitenkin putoaa hiukan 9 GHz:n taajuudella. Keskihajonta tuloksissa on suuri johtuen voimakkaasta pääkeilasta. Maksimiarvo on suurin TH140h770:ssa 3 GHz:n taajuudella, mutta 9 GHz:n taajuudella TH7 ja TH9 ohittavat sen.

Taulukossa 13 on esitetty keskiarvot ja maksimit normalisoituna vastaavan kokoisen metallilevyn tutkapoikkipinta-alalla.

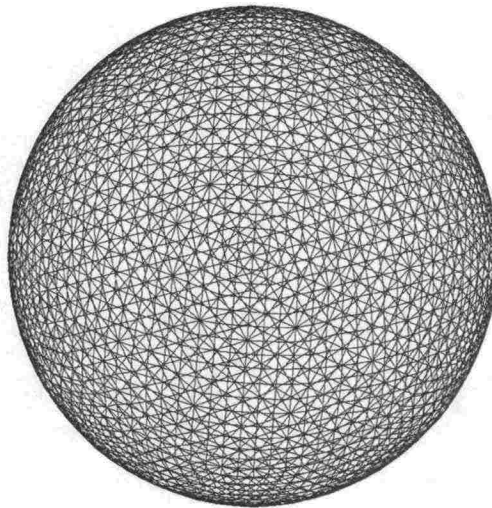
Taulukko 13. Keskiarvot ja maksimit kokoerojen huomioidessa.

Ryhmä I TH140	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
	-10,3	-14,3	-8,6	-9,7
TH1	-16,5	-21,1	-10,7	-16,5
TH7	-18,8	-22,1	-12,6	-15,3
TH9	-16,7	-19,9	-7,8	-12,0
TH140h770	-18,8	-24,9	-9,7	-16,0

Taulukosta 13 voidaan todeta, että kokoonsa nähden TH140h770 sirontaominaisuudet ovat heikoimmat. Sillä on paras arvo vain maksimille 3 GHz:n taajuudella. Tuloksista nähdään, että venytyksen seurauksena soppien optimaalinen muoto ja suuntaus kadotetaan. Tässä on kuitenkin syytä painottaa, että venyttäminen luultavasti kasvattaa absoluuttista tutkapoikkipinta-arvoa, muttei niin nopeasti kuin mallin poikkipinta-ala kasvaa.

Liite C: Referenssilaskennat

Radiokaiuttomassa huoneessa suoritettavia mittauksia varten osana selvityshanketta laskettiin referenssitulokset mittausjärjestelmän kalibroinnissa käytettävälle kohteelle. Kalibroinnissa käytetään palloa, jonka tutkapoikkipinta-ala voidaan analyttisesti ratkaista. Pallon halkaisija on 40 cm. Referenssilaskennoissa käytetty malli on esitetty kuvassa 40. Se koostuu 5120 tasokolmioista.



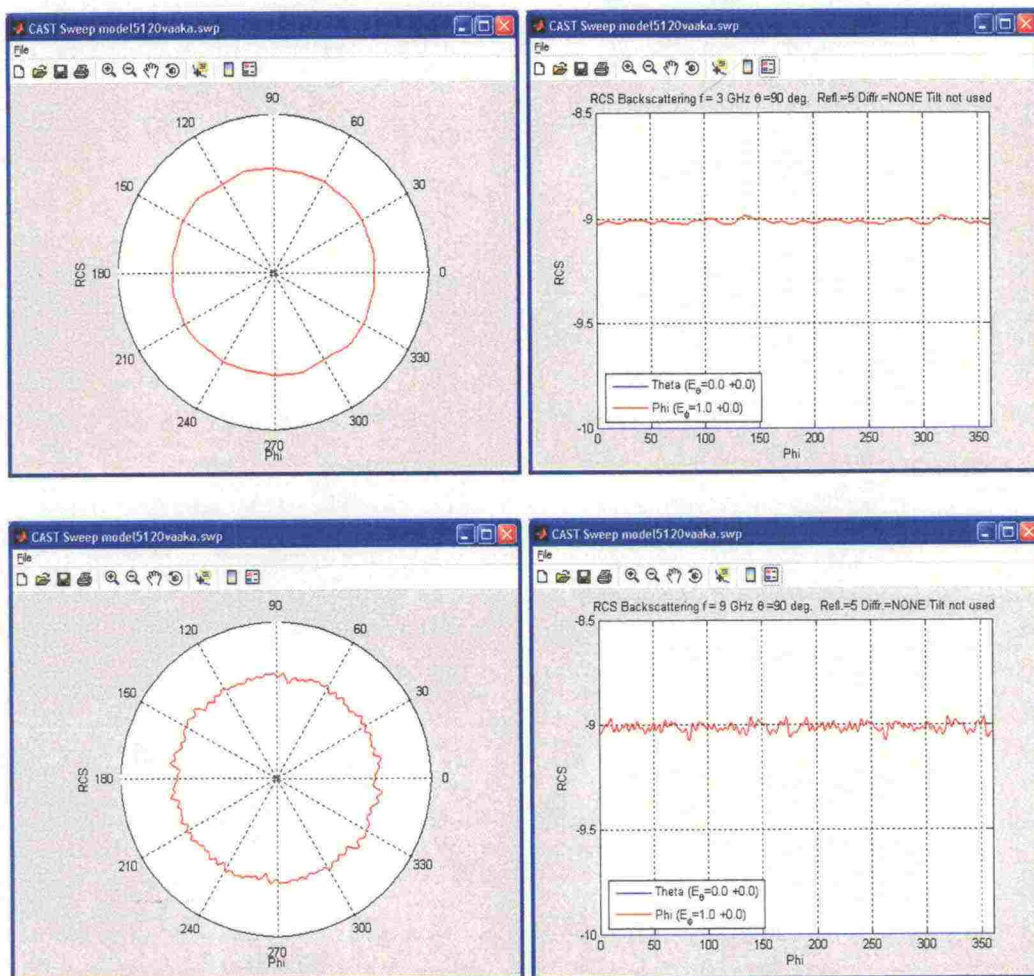
Kuva 40. Laskentamalli kalibroinnissa käytettävälle pallomallille.

Geometrisen optiikan avulla pallon tutkapoikkipinta-ala voidaan laskea yksinkertaisella kaavalla, kun pallon säde oletetaan olevan aallonpituuksina suuri. Kaava on

$$RCS = \pi \cdot r^2, \quad (4)$$

missä r on pallon säde aallonpituuksina. Koska kalibroinnissa käytettävän pallon säde on 20 cm, on sen tutkapoikkipinta-ala 3 GHz:n taajuudella -9.0079 dB ja 9 GHz:n taajuudella -9.1 dB.

Kuvassa 41 on laskettu CAD-ohjelmistolla vastaava malli vaakapyyhkäisyllä. Säteilykuvioissa tutkapoikkipinta-alan tulisi olla vakio, mutta CAST-ohjelmistolla lasketuissa tuloksissa esiintyy pientä tasovaihtelua. Tämä johtuu siitä, että pallon kupera pinta on mallinnettu tasokolmioilla, jolloin mallin geometriaan syntyy mallinnusvirhettä, mikä taas kuvissa näkyy tasovaihteluna.



Kuva 41. Kalibrointimallin tulokset. Ylhäällä tulokset 3 GHz:n taajuudella ja alhaalla tulokset 9 GHz:n taajuudella.

Analyysissä käytetyillä tutkaheijastimilla virheen voidaan olettaa olevan pienempi, koska sopet muodostuvat tasopinnoista ja niiden yhteydessä geometriset mallinnusvirheet ovat pienempiä.

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo.....	i
1 Johdanto	1
2 Laskentatapa.....	1
3 Analysoitavat tutkaheijastinmallit.....	1
3.1 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2, TH320pp ja TH320ppk2).....	2
3.2 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6, TH450h450, TH450s8 ja TH450s8k2).....	3
4 Sirontarasterit	4
4.1 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2, TH320pp ja TH320ppk2).....	4
4.2 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6, TH450h450, TH450s8 ja TH450s8k2).....	7
5 Tehotasojen vaihtelujen vertailu.....	10
5.1 Halkaisija 32 cm (TH320pp ja TH320ppk2).....	10
5.2 Halkaisija 45 cm (TH450s8 ja TH450s8k2)	11
6 Tarkasteluvälin rajausta ja sironta-arvojen keskiarvoistaminen.....	13
6.1 Halkaisija 32 cm (TH320pp ja TH320ppk2).....	13
6.2 Halkaisija 45 cm (TH450s8 ja TH450s8k2)	14
7 Tutkaheijastimen asennon huomiointi.....	15
7.1 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2, TH320pp ja TH320ppk2).....	15
7.2 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6, TH450h450, TH450s8 ja TH450s8k2).....	17
8 Tilastolliset tunnusluvut	18
8.1 Keskiarvo, keskihajonta ja maksimi.....	18
9 Soppikerrosten välinen etäisyys	21
10 Yhteenveto	23
Lähdeluettelo	24
Liite A: Normalisoidut tunnusluvut.....	1
Liite B: Kahden pistelähteen laskettu tutkavaste	2

1 Johdanto

Tämä tutkimus on jatkoa VTT Tietotekniikan Merenkulkulaitokselle tekemälle tutkaheijastinten analysointihankkeelle, jossa selvitettiin käytössä olevien tutkaheijastinmallien ja referenssimallien heijastusominaisuuksia S- (3 GHz) ja X- (9 GHz) taajuusalueilla [1], [2].

Tässä analyysissä tarkasteltiin paristoputken läpiviennin ja toisen soppikerroksen lisäyksen vaikutusta referenssimalleihin, joiden halkaisija oli 32 cm ja 45 cm. Tehtävään kuului myös laskea soppikerrosten välinen etäisyys 2-kerroksisten mallien tapauksissa S- ja X-alueella niin, että vedenpinnan kautta tapahtuvan monitie-etenemisen aiheuttamaa signaalin kuoleutumista saataisiin pienennettyä.

2 Laskentatapa

Laskentatapa on tarkemmin esitetty lähteessä [2] ja laskentaparametrit taulukossa 1.

Taulukko 1. Laskennassa käytetyt parametrit.

Parametri	Arvoalue
Taajuus	3 ja 9 GHz
Theta-kulma (kiertää kohteen ylhäältä alas)	Vaakapyyhkäisyssä 90° Pystypyyhkäisyssä 0° - 360° Koko avaruudelle suoritettussa pyyhkäisyssä 0° - 180°
Phi-kulma (kiertää kohteen vastapäivään horisontaalitasossa)	Vaakapyyhkäisyssä 0° - 360° Pystypyyhkäisyssä 0° Koko avaruudelle suoritettussa pyyhkäisyssä 0° - 360°
Polarisaatio	Vaakapolarisaatio
Heijastusten määrä	5

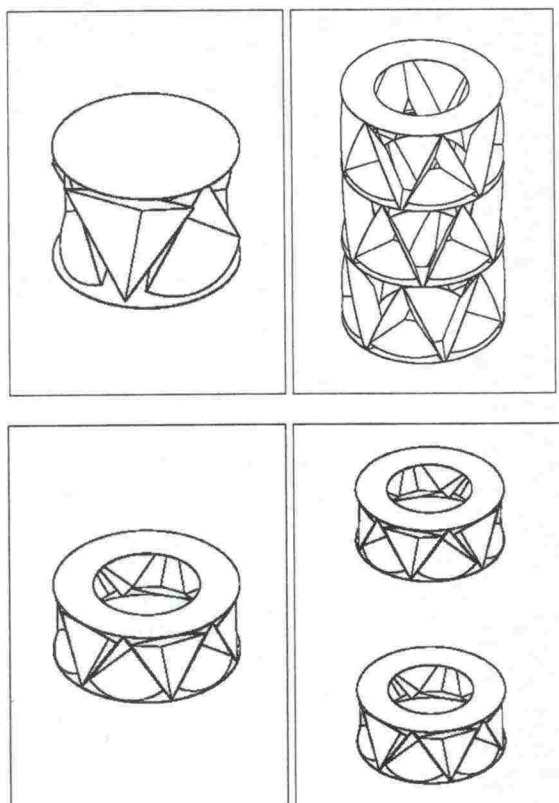
Tutkapoikkipinta-alan yksikkö on dBm². Pinta-alayksikköä ei erikseen esitetä, vaan tulokset esitetään lyhyesti dB-muodossa.

3 Analysoitavat tutkaheijastinmallit

Tarkasteltavat tutkaheijastinmallit ovat halkaisijaltaan 32 cm ja 45 cm. Ne kuuluvat lähteessä [2] esitettyihin tutkaheijastinryhmiin III ja V.

3.1 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2, TH320pp ja TH320ppk2)

Ryhmään III kuuluvat aikaisemmin analysoidut tutkaheijastinmallit TH320 (referenssimalli) ja TH2 sekä uudet mallit TH320pp (TH320 paristoputken läpiviennillä) ja TH320ppk2 (TH320pp kahdessa kerroksessa). Ryhmään kuuluvat mallit on esitetty kuvassa 1. Mallien mitat ja poikkipinta-alat on esitetty taulukossa 2.



Kuva 1. Ryhmään III kuuluvat mallit. Ylhäällä vasemmalta oikealle TH320 ja TH2. Alhaalla vasemmalta oikealle TH320pp ja TH320ppk2.

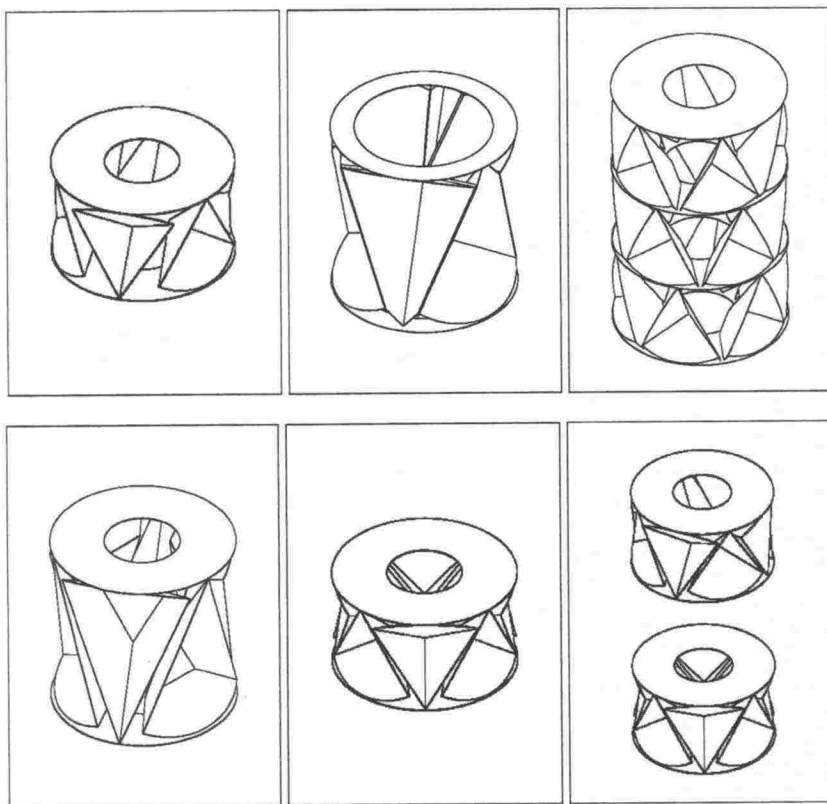
Taulukko 2. Ryhmään III kuuluvien mallien mitat ja poikkipinta-alat.

	Halkaisija [cm]	Korkeus [cm]	Poikkipinta-ala [cm ²]
TH320	32,00	23,00	736,00
TH2	32,00	53,00	1696,00
TH320pp	32,00	13,60	435,20
TH320ppk2	32,00	67,20	870,40

Tutkaheijastinmalleissa TH320pp ja TH320ppk2 paristoputken läpivienti on 184 mm. TH320ppk2:ssa soppikerroksien väli mitattuna ylemmän soppikerroksen alareunasta alemman soppikerroksen yläreunaan on 400 mm.

3.2 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6, TH450h450, TH450s8 ja TH450s8k2)

Ryhmään V kuuluvat aikaisemmin analysoidut mallit TH450 (referenssimalli), TH5, TH6, TH450h450 sekä uudet mallit TH450s8 (TH450 kahdeksalla sopella kuuden sijasta) ja TH450s8k2 (TH450s8 kahdessa kerroksessa). Ryhmään kuuluvat mallit on esitetty kuvassa 2. Mallien mitat ja poikkipinta-alat on esitetty taulukossa 3.



Kuva 2. Ryhmään V kuuluvat mallit. Ylhäällä vasemmalta oikealle TH450, TH5 ja TH6.
Alhaalla vasemmalta oikealle TH450h450, TH450s8 ja TH450s8k2.

Taulukko 3. Ryhmään V kuuluvien mallien mitat ja poikkipinta-alat.

	Halkaisija [cm]	Korkeus [cm]	Poikkipinta-ala [cm ²]
TH450	45,00	26,00	1170,00
TH5	45,00	45,00	2025,00
TH6	45,00	69,00	3105,00
TH450h450	45,00	45,00	2025,00
TH450s8	45,00	26,00	1170,00
TH450s8k2	45,00	92,00	2340,00

Tutkaheijastinmalleissa TH450s8 ja TH450s8k2 paristoputken läpivienti on 184 mm. TH450s8k2:ssa soppikerroksien väli mitattuna ylemmän soppikerroksen alareunasta alemman soppikerroksen yläreunaan on 400 mm.

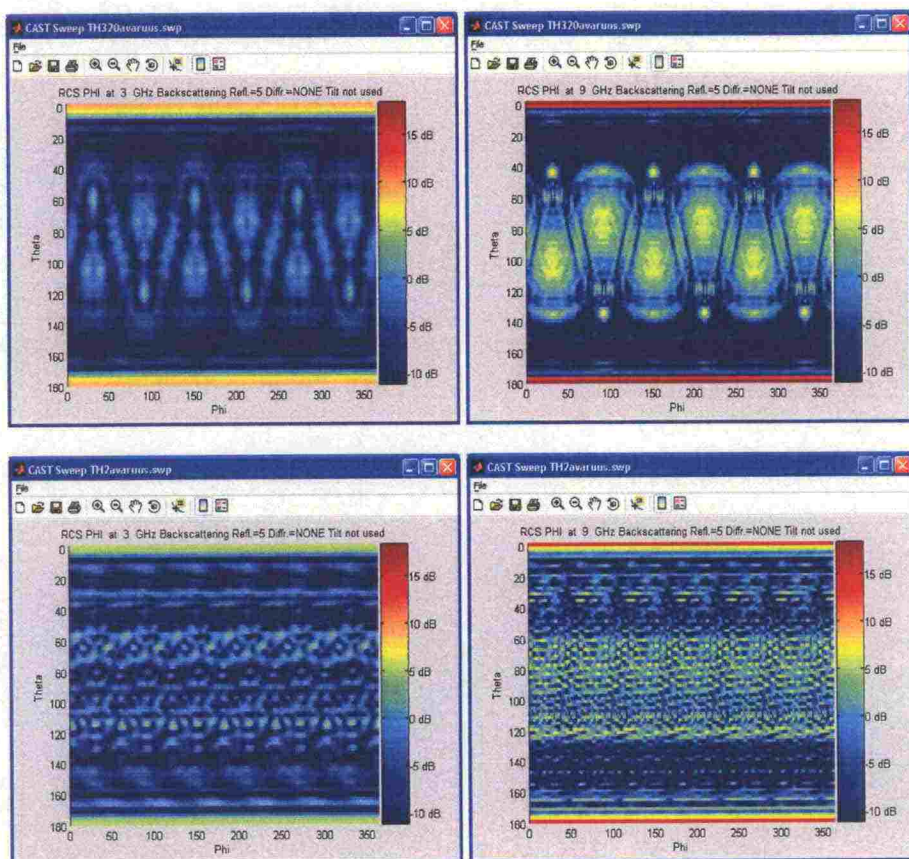
4 Sirontarasterit

Tässä luvussa on esitetty ryhmien III ja V sirontarasterit 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla tutkimusraporteissa [1] ja [2] analysoiduilla ja uusilla malleilla. Aikaisemmin tutkittujen mallien (TH320, TH2, TH450, TH5, TH6, TH450h450) sirontakuviot on esitetty eri tutkaheijastinmallien heijastusominaisuuksien vertailemiseksi. Analysoinneissa on keskitytty uusiin malleihin (TH320pp, TH320ppk2, TH450s8 ja TH450s8k2). Tarkastelussa on kiinnitetty erityisesti huomiota lähellä vaakatasoa oleviin arvoihin. Laskennassa on huomioitu vain vaakapolarisaatio.

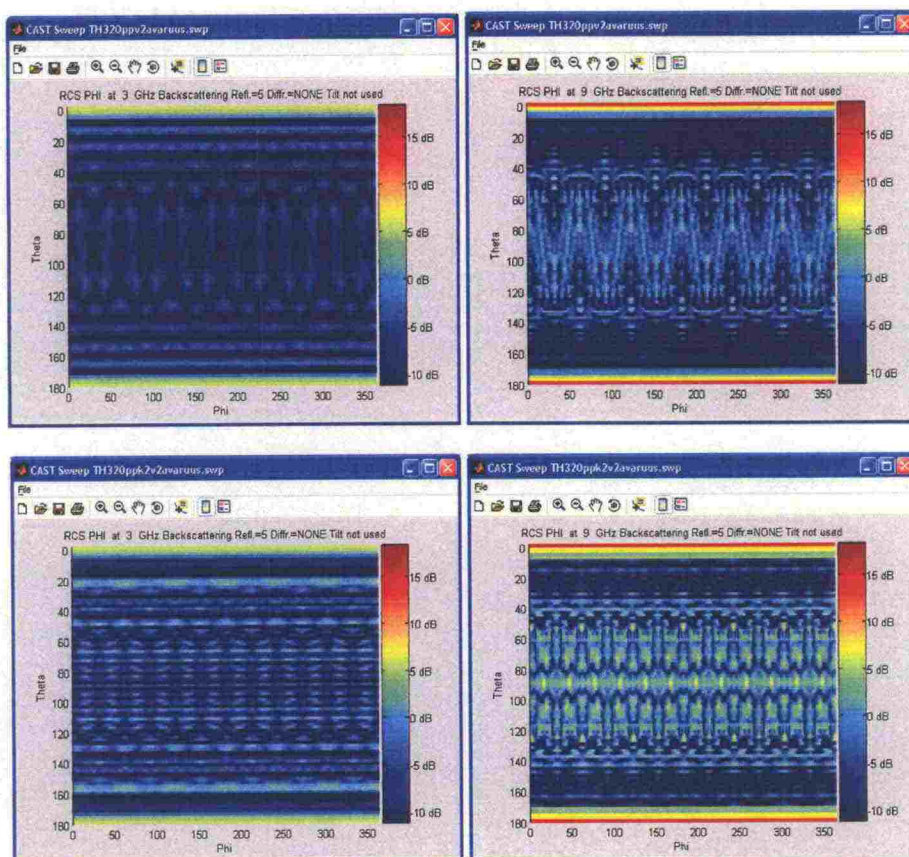
Sirontarastereiden minimi- ja maksimiarvot on asetettu sen tutkaheijastimen mukaan, jolla on tutkaheijastinryhmän suurin maksimiarvo. Minimiarvo on 30 dB maksimiarvoa alhaisempi. Rastereissa rivit edustavat eri θ -avaruuskulmia ja sarakkeet eri ϕ -avaruuskulmia. Theta-kulma kiertää tutkaheijastinta ylhäältä alas. Suunta suoraan ylhäältä on 0°, vaakatasosta 90° ja alhaalta 180°. Phi-kulma on määritelty 0° - 360° ja sen kiertosuunta on vastapäivään. Suunta 0° on suoraan edestä.

4.1 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2, TH320pp ja TH320ppk2)

Kuvissa 3 ja 4 on esitetty ryhmän III sirontarasterit.



Kuva 3. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH320 ja TH2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksella. Raja-arvot ovat 18,6 dB ja -11,4 dB.



Kuva 4. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH320pp ja TH320ppk2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksella. Raja-arvot ovat 18,6 dB ja -11,4 dB.

TH320pp eroaa TH320:sta siten, että siihen on mallinnettu paristoputken läpivienti ja samalla soppien määrää on kasvatettu kuudesta kahteentoista. Kun malleja vertaillaan keskenään, huomataan että TH320pp:llä keskimääräinen sirontataso on alhaisempi kuin TH320:llä, mutta sirontarasterin muoto säilyy samanlaisena. Kuvasta näkyy selvästi soppien määrä mallissa: TH320:ssa kuusi ja TH320pp:ssä kaksitoista. Koska TH320pp:n sopet ovat kooltaan pienempiä kuin TH320:n, on sirontataso sen soppien kohdalla matalampi ja sen sirontarasterissa esiintyy enemmän tasovaihtelua. 2-kerroksisessa TH320ppk2:ssa soppien asentaminen kahteen kerrokseen aiheuttaa sirontakuvion liuskoittumista. Etenkin pystykulmilla (theta-kulmat) 3 GHz:n taajuudella sirontatasossa on suuria eroja, kun taas vaakakulmilla (phi-kulmat) sirontataso säilyy varsin tasaisena. 9 GHz:n taajuudella TH320ppk2:n sirontarasterissa näkyy liuskoittumista, mutta pystykulmilla 40°-140° sirontataso säilyy suhteellisen korkeana.

Taulukossa 4 on esitetty tutkaheijastimien korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot. Taulukosta nähdään, että soppien koon ja sitä kautta tutkaheijastimen poikkipinta-alan pienentämisellä on selvä vaikutus tutkapoikkipintaan. Käytettäessä 2-kerroksista mallia heijastimen poikkipinta-ala kaksinkertaistuu ja samalla keskimääräinen sirontataso kasvaa, joskin poikkipinta-alaa hitaammin.

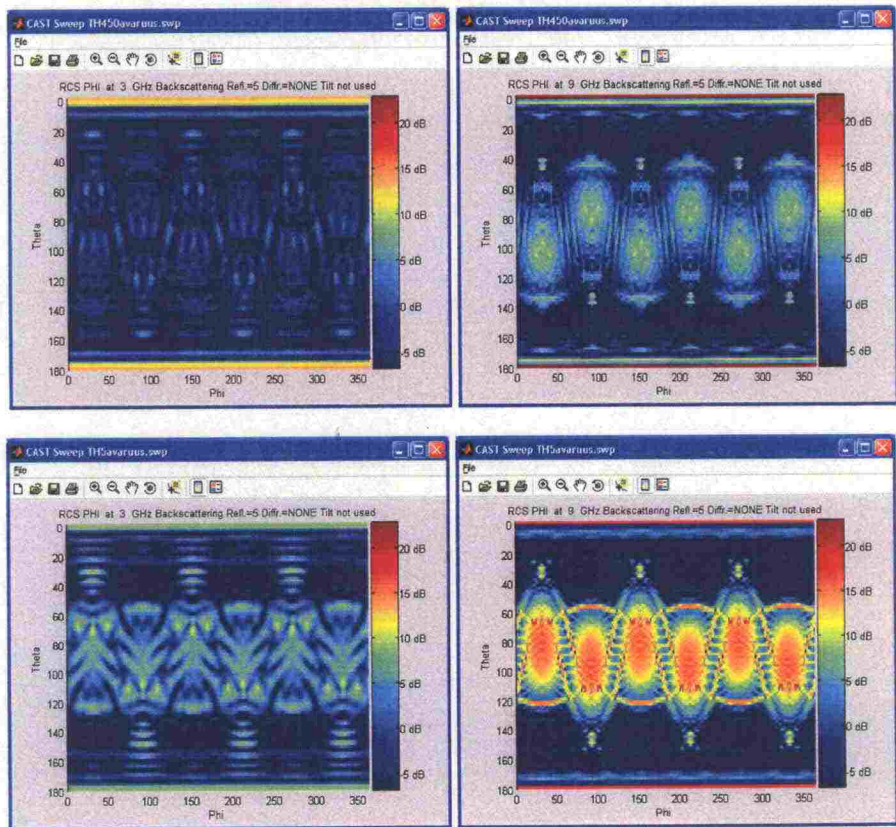
Taulukko 4. TH320:n, TH2:n, TH320pp:n ja TH320ppk2:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

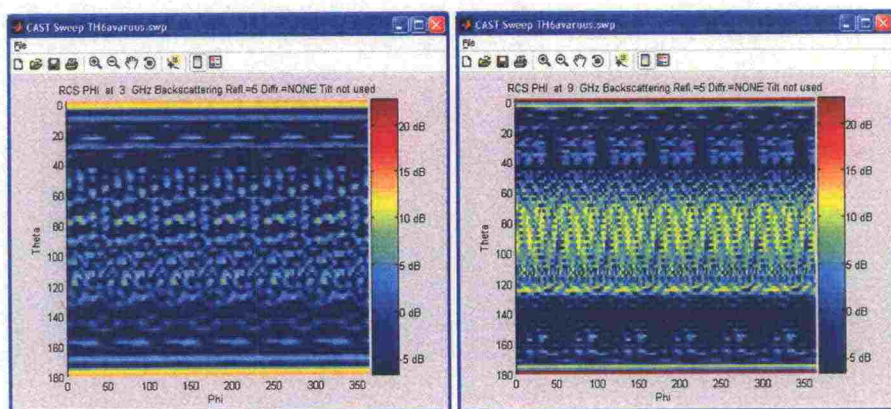
	TH320	TH2	TH320pp	TH320ppk2
Korkeus [cm]	23,00	53,00	13,60	27,20
Suhteellinen *)	1,00	2,30	0,59	1,18
(3 GHz) [dB]				
Sirontataso	-1,44	-3,35	-4,87	-3,67
Suhteellinen	1,00	0,64	0,45	0,60
(9GHz) [dB]				
Sirontataso	4,42	1,89	0,69	1,99
Suhteellinen	1,00	0,56	0,42	0,57

*) Suhteellinen tarkoittaa arvojen normalisointia referenssimallin TH320 arvoilla.

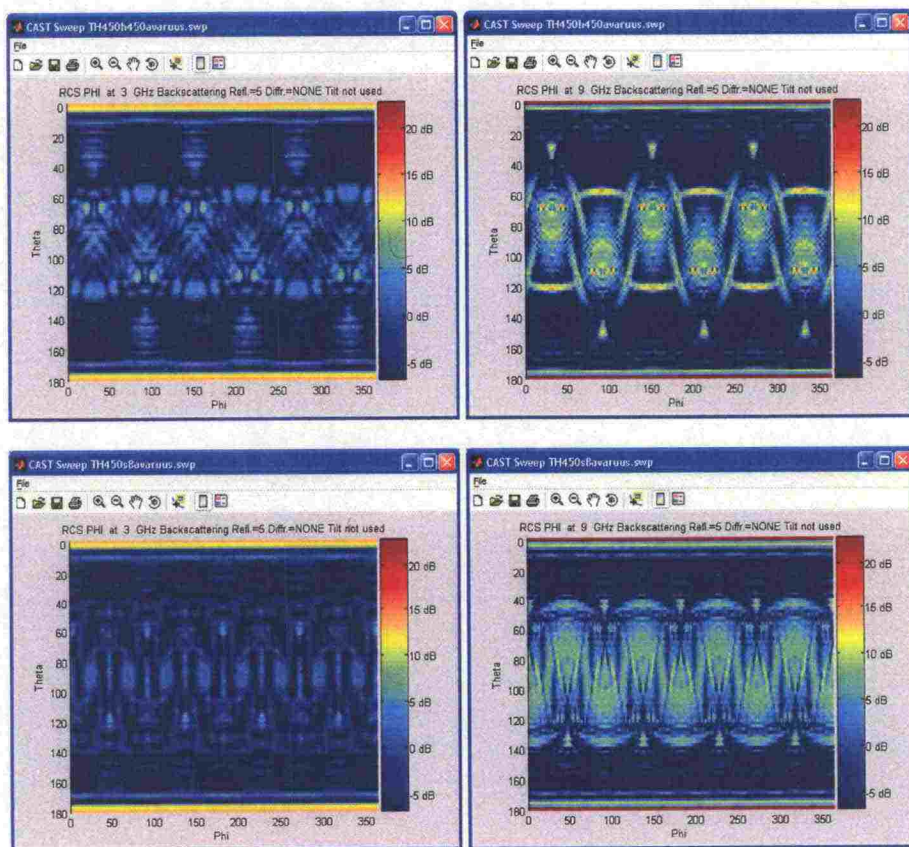
4.2 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6, TH450h450, TH450s8 ja TH450s8k2)

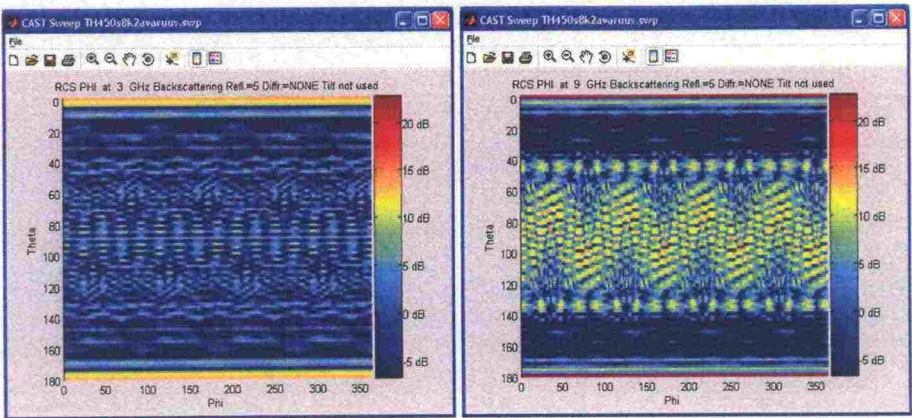
Kuvissa 5 ja 6 on esitetty ryhmän V sirontarasterit.





Kuva 5. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH450, TH5 ja TH6. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksella. Rajat ovat 23,0 dB ja -7,0 dB.





Kuva 6. Sirontarasterit on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä Th450h450, TH450s8 ja TH450s8k2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksilla. Rajat ovat 23,0 dB ja -7,0 dB.

TH450s8 eroaa TH450:sta siten, että siinä on kasvatettu soppien määrää kuudesta kahdeksaan. Kun TH450:ssä esiintyvät soppien väliset aukot poistetaan, vähenevät minimikohdat sirontarasterissa molemmilla taajuuksilla. 2-kerroksisessa TH450s8k2-mallissa sirontakuviossa esiintyy monikerroksiselle mallille tyypillistä sirontakuviollisuuskoktumista (vertaa TH6:n sirontarasteriin). Keskimääräinen sirontataso on kuitenkin suhteellisen korkea pystykulmavälillä 40°-140°.

Taulukossa 5 on esitetty tutkaheijastimien korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot. TH450s8:n poikkipinta-ala on sama kuin referenssimallin TH450, mutta sen sirontataso on korkeampi. 2-kerroksisen TH450s8k2:n keskimääräinen sirontataso on korkeampi kuin TH450:llä tai TH450s8:lla, mutta suhteessa poikkipinta-alan kasvuun sirontatason kasvu on selvästi pienempää.

Taulukko 5. TH450:n, TH5:n, TH6:n, TH450h450:n, TH450s8:n ja TH450s8k2:n korkeudet ja keskimääräiset sirontatasot.

	TH450	TH5	TH6	TH450h450	TH450s8	TH450s8k2
Korkeus [cm]	26,00	45,00	69,00	45,00	26,00	52,00
Suhteellinen*)	1,00	1,73	2,65	1,73	1,00	2,00
(3 GHz) [dB]						
Sirontataso	1,16	1,93	2,35	1,72	1,29	2,66
Suhteellinen	1,00	1,19	1,31	1,14	1,03	1,41
(9GHz) [dB]						
Sirontataso	7,62	8,71	8,36	7,75	7,83	8,75
Suhteellinen	1,00	1,29	1,19	1,03	1,05	1,30

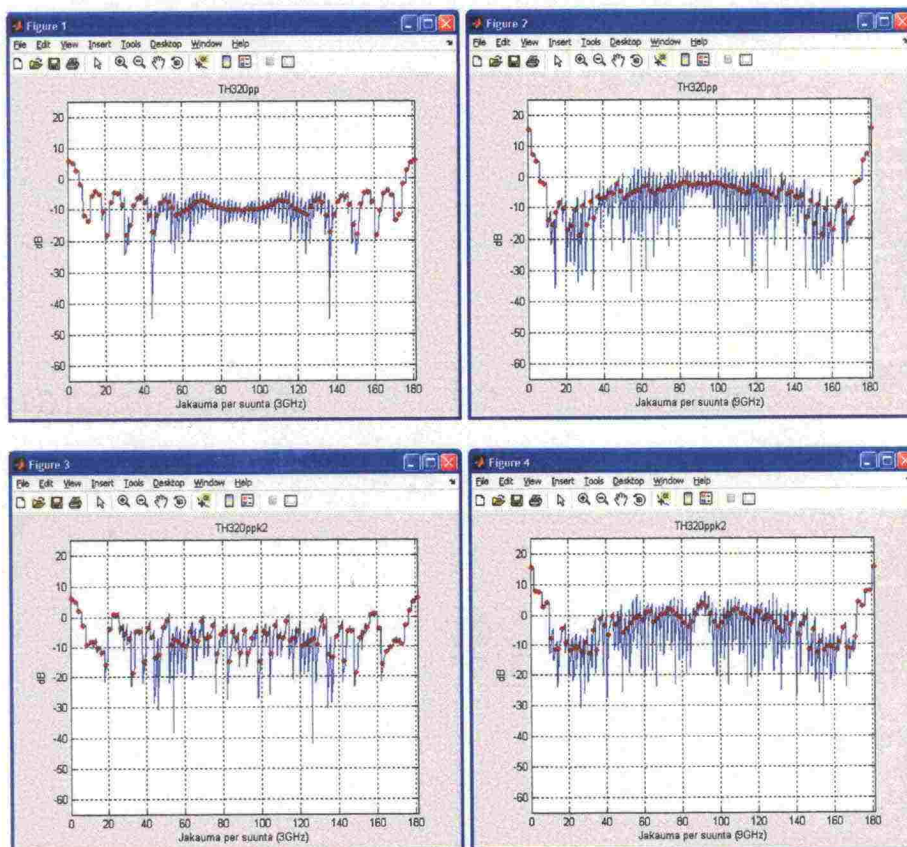
*) Suhteellinen tarkoittaa arvojen normalisointia referenssimallin TH450 arvoilla.

5 Tehotasojen vaihtelujen vertailu

Analysoinnissa käytetty tehotasojen vertailumenetelmä on kuvattu tarkemmin lähteessä [2]. Vertailussa on esitetty laskentatulokset eri malleilla 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla. Kuviissa x-akselina on pystykulma-alue ($0^\circ - 180^\circ$) ja y-akselina tutkapoikkipinta-ala (-65dB - 25dB). Tulosten tarkastelun helpottamiseksi keskimääräiset tutkapoikkipinta-alat eri pystykulmilla on esitetty kuvissa punaisella värillä. Analysoinnissa on tarkemmin keskitytty pystykulma-alueelle $40^\circ - 140^\circ$.

5.1 Halkaisija 32 cm (TH320pp ja TH320ppk2)

Uusien ryhmään III kuuluvien tutkaheijastinmallien pystykulma-kohtaiset takaisinsironta-arvot on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH320pp ja TH320ppk2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

Hajonta säilyy varsin pienenä läpi tarkastelualueen. Tasovaihtelut TH320pp:ssä ovat 3 GHz:n taajuudella sitä pienempiä mitä lähempänä ollaan vaakatasoa. Pystykulmien 45° ja 135° ulkopuolella tasovaihtelut kasvavat selvästi. Vasta kulmilla 45° ja 135° on

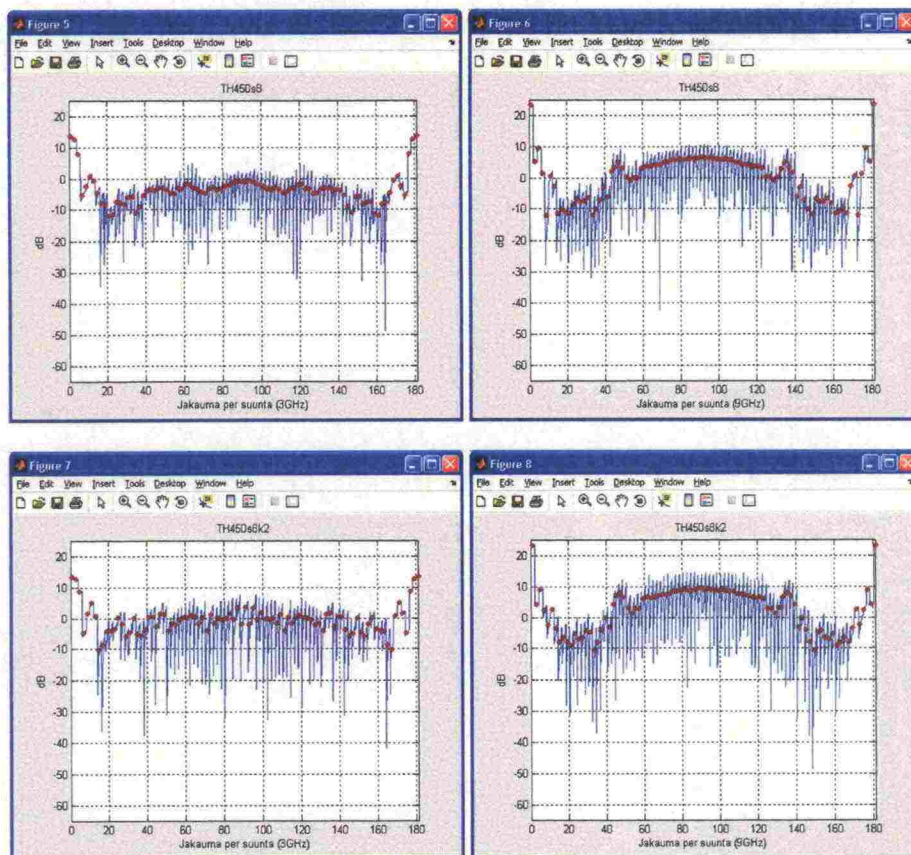
havaittavissa voimakkaat yksittäiset minimikohdat. Pääkeilaa ei varsinaisesti ole, mutta suuntiin 70° ja 110° näkyvät ensimmäisen kertaluvun sivukeilat. 9 GHz:n taajuudella hajonta kasvaa siirryttäessä pois vaakatasosta. Sirontakuvioon ilmestyy leveä pääkeila suuntaan 90° ja kapeat sivukeilat suuntiin 45° , 60° , 120° ja 135° .

2-kerroksisen TH320ppk2:n sirontakuviossa esiintyy suuria tasovaihteluja 3 GHz:n taajuudella. Hajonta on suurta suunnissa 60° ja 120° . Näiden suuntien lähellä esiintyy myös syviä minimikohtia. 9 GHz:n taajuudella sirontakuviossa on kapea pääkeila suuntaan 90° ja sivukeilat suuntiin 60° , 70° , 110° ja 120° . Hajonta on pientä lähellä vaakatasoa, mutta kasvaa nopeasti siirryttäessä pois pääkeilan alueelta. Tämä on tyypillistä monikerroksiselle tutkaheijastinmallille.

Kun TH320:n ja TH320pp:n tehotasoja vertaillaan keskenään, on TH320pp:n tehotaso selvästi alhaisempi kuin TH320:n johtuen pienemmästä soppikoosta. TH320ppk2:n sirontakuvio muistuttaa TH2:n sirontakuviota, sillä molemmissa tutkaheijastinmalleissa on käytetty kerroksellista rakennetta. TH320ppk2:ssa sopet ovat kahdessa kerroksessa ja TH2:ssa kolmessa kerroksessa.

5.2 Halkaisija 45 cm (TH450s8 ja TH450s8k2)

Uusien ryhmän V mallien pystykulmakohtaiset takaisinsironta-arvot on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH450s8 ja TH450s8k2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksilla.

3 GHz:n taajuuksilla TH450s8:n sirontakuviot ovat tasaisia läpi koko tarkastelualueen. Suuntaan 90° on havaittavissa heikko pääkeila ja suuntiin 45° , 60° , 120° ja 135° heikot sivukeilat. Hajonta on suurta koko tarkastelualueella. 9 GHz:n taajuuksilla pääkeila erottuu selkeämmin ja sivukeilojen määrä on pudonnut kahteen ja ne ovat voimistuneet. Sivukeilat ovat suunnissa 45° ja 135° . Hajonta on hieman kasvanut verrattuna 3 GHz:n tapaukseen.

TH450s8k2:n sirontakuviot 3 GHz:n taajuuksilla ei näy selkeitä pää- tai sivukeiloja. Tasovaihtelut ja hajonta ovat suuria. 9 GHz:n taajuuden sirontakuviot ilmestyy leveä pääkeila suuntaan 90° ja kapeat sivukeilat suuntiin 45° ja 135° . TH450s8:n ja TH450s8k2:n sirontakuviot ovat molemmilla taajuuksilla samankaltaiset. Suuremmasta poikkipinta-alasta johtuen TH450s8k2:n tehotoso on molemmilla taajuuksilla likimain 3 dB:tä korkeampi kuin TH450s8:n.

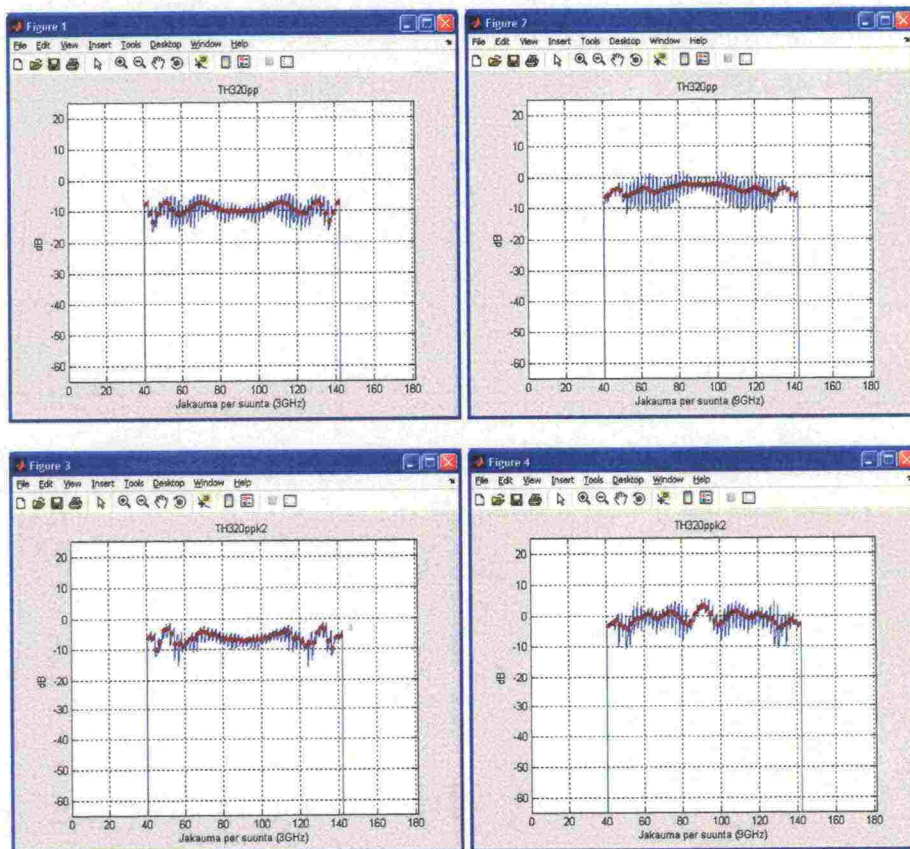
Kun malleja TH450s8 ja TH450s8k2 verrataan referenssimalliin TH450, havaitaan keskimääräisen sirontataso olevan korkeampi, koska malleista on poistettu raot soppien välistä lisäämällä niihin lisäsopeja.

6 Tarkasteluvälin rajausta ja sironta-arvojen keskiarvoistaminen

Seuraavaksi tarkastelu rajattiin pystykulma-alueelle 40° - 140° ja laskennalliset epätarkkuudet sekä nopeat tasovaihtelut poistettiin tuloksista liukuvalla keskiarvoistus-ikkunalla. Menetelmä on kuvattu tarkemmin lähteessä [2].

6.1 Halkaisija 32 cm (TH320pp ja TH320ppk2)

Kuvassa 9 on esitetty ryhmään III kuuluvien uusien mallien tulokset pystykulmarajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen.



Kuva 9. Keskiarvoistetut sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH320pp ja TH320ppk2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuuksilla.

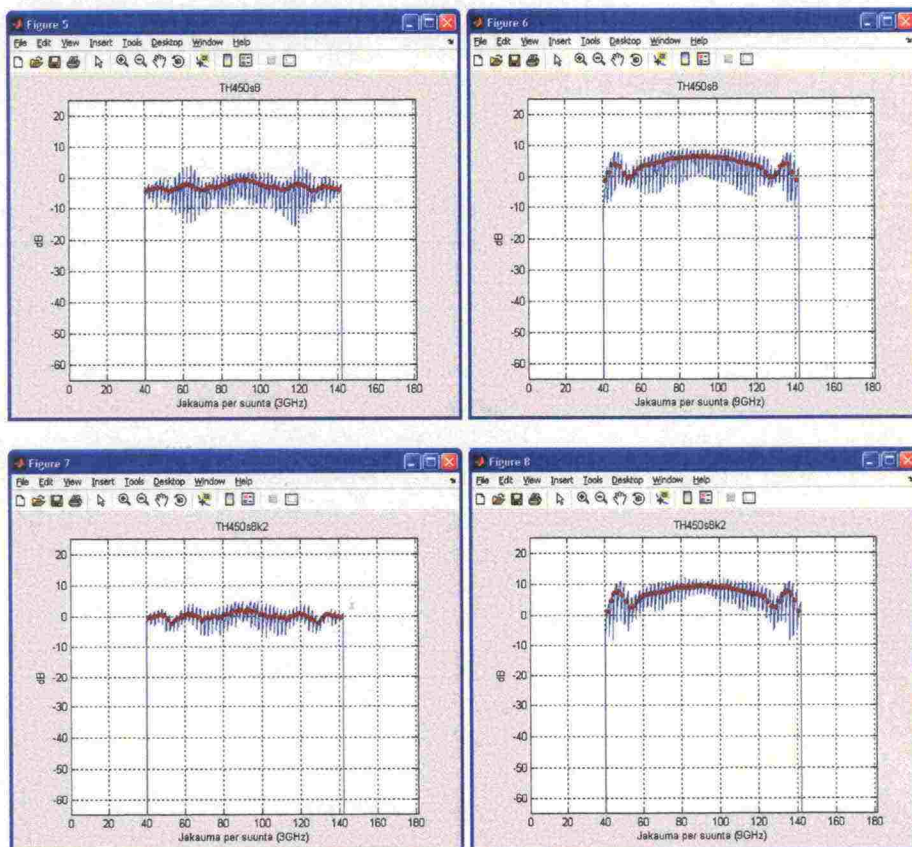
TH320pp:n sirontarasteri on tasainen molemmilla taajuuksilla. Hajonta etenkin 3 GHz:n taajuuksilla pysyy pienenä. 3 GHz:n taajuuksilla sirontakuviossa esiintyy sivukeiloja suuntiin 50° , 70° , 110° ja 130° . Selkeää pääkeilaa sirontakuviosta ei näy. 9 GHz:n

taajuudella sirontakuviosta erottuu leveä pääkeila suuntaan 90° ja kapeat sivukeilat suuntiin 45° , 60° , 120° ja 135° .

3 GHz:n taajuudella TH320ppk2:n ja TH320pp:n sirontakuviot muistuttavat toisiaan. Tehotaso TH320ppk2:ssa on likimain 3 dB suurempi. Hajonta TH320ppk2:ssa on molemmilla taajuuksilla pienempi kuin TH320pp:ssä. Referenssimallin TH320 tehotaso on pääsääntöisesti molempia malleja korkeampi, koska siinä on käytössä suurempi soppikoko. Erot TH320:n ja TH320ppk2:n tehotasojen välillä ovat kuitenkin varsin pieniä.

6.2 Halkaisija 45 cm (TH450s8 ja TH450s8k2)

Kuvassa 10 on esitetty ryhmään V kuuluvien uusien mallien tulokset pystykulmarajauksen ja keskiarvoistuksen jälkeen.



Kuva 10. Keskiarvoistetut sirontakuviot on esitetty ylhäältä alas järjestyksessä TH450s8 ja TH450s8k2. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella.

TH450s8:n tehotaso on tasainen läpi tarkastelualueen. Hajonta on suuri molemmilla taajuuksilla. 3 GHz:n taajuudella näkyy sirontakuviossa leveä pääkeila suuntaan 90° ja

kapeat sivukeilat suuntiin 60° ja 120° . 9 GHz:n taajuudella pääkeila levenee ja sivukeilat vahvistuvat. Sivukeilat ovat suuntiin 45° ja 135° .

TH450s8k2:n hajonta on molemmilla taajuuksilla pienempi kuin TH450s8:ssa. Hajonta kasvaa hiukan siirryttäessä vaakatasosta poispäin. TH450s8k2:n tehotaso on noin 3 dB korkeampi, sillä mallilla on suurempi poikkipinta-ala kuin TH450s8:lla. Muuten sirontakuviot muistuttavat toisiaan.

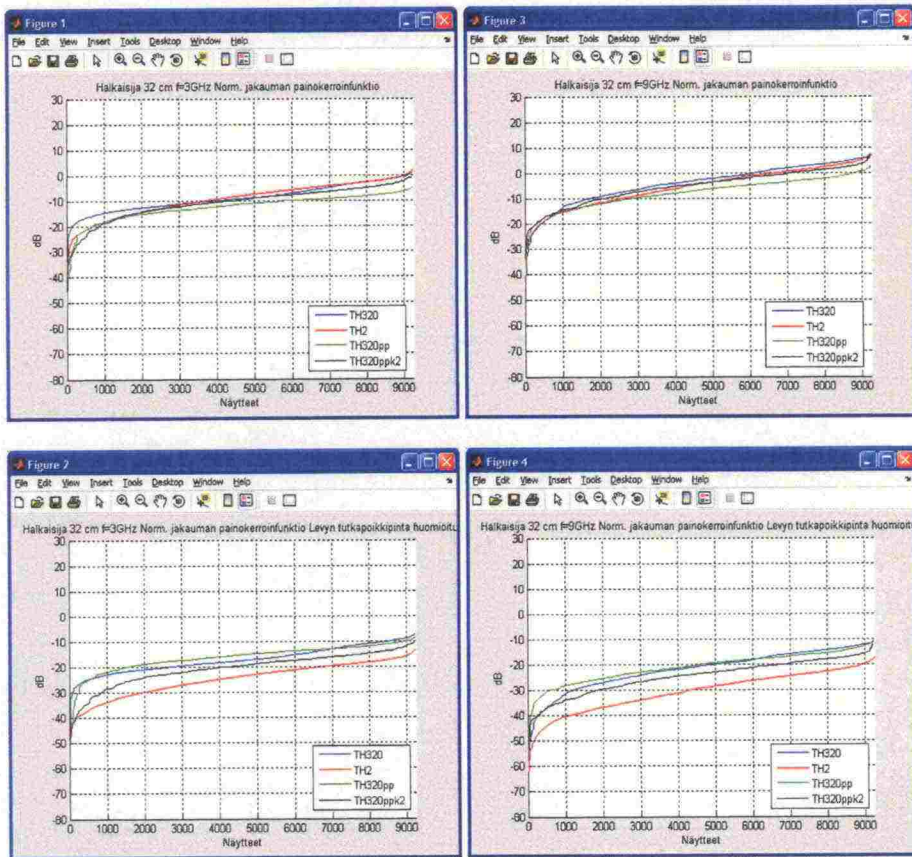
Kun uusia malleja verrataan ryhmän referenssimalliin, keskimääräisissä sirontataso-arvoissa ei ole suuriakaan eroja. Suurimmat erot syntyvät hajonnassa.

7 Tutkaheijastimen asennon huomiointi

Tutkaheijastimen eri asentojen vaikutusta sirontakuviioon tutkittiin Bell-todennäköisyys-funktiolla, jonka käyttöä on esitelty tarkemmin lähteessä [2].

7.1 Halkaisija 32 cm (TH320, TH2, TH320pp ja TH320ppk2)

Kuvassa 11 on esitetty ryhmän III tutkaheijastimien sironta-arvot painotettuina eri asentojen todennäköisyyksillä. Tulokset on esitetty 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla absoluuttisina ja normalisoituina. Normalisoinnissa sironta-arvoista on vähennetty poikkipinta-alaltaan vastaavan metallilevyn tutkapoikkipinta-ala.



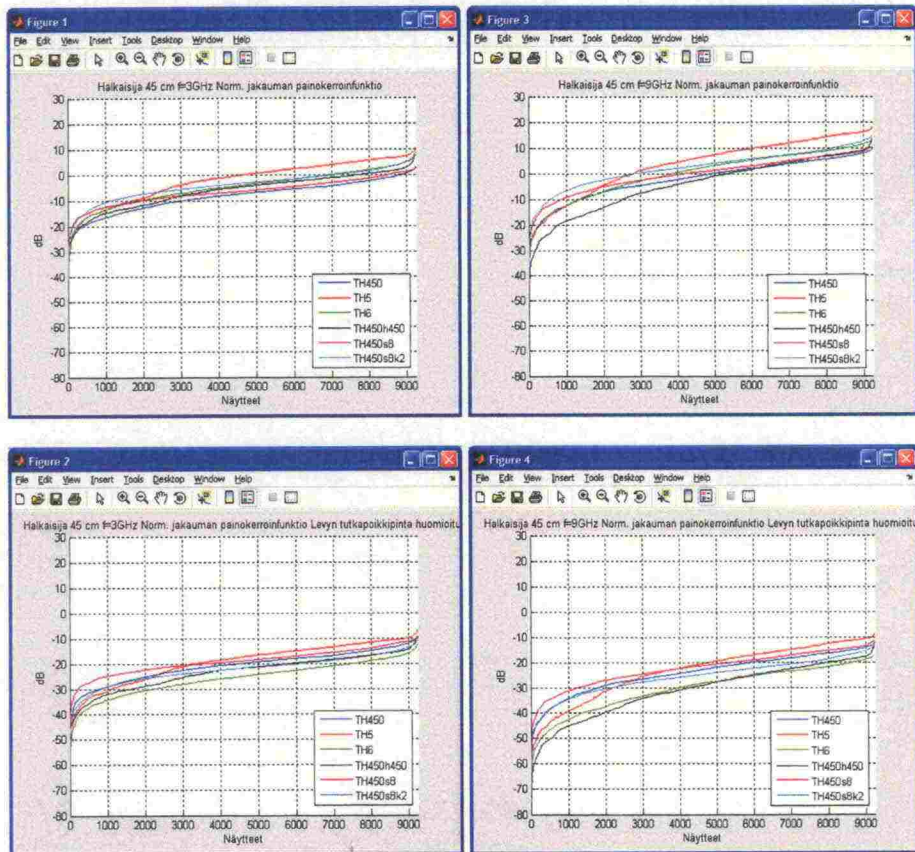
Kuva 11. Tutkaheijastimen eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot ryhmän III tutkaheijastimille. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Ylhäällä ovat absoluuttiset ja alhaalla normalisoidut tulokset.

Kun mallien sirontakuviota tarkastellaan 3 GHz:n taajuudella absoluuttisina arvoina, TH320:ä voidaan pitää parhaiten sirottavana, koska sen käyrän alle jäävä pinta-ala on suurin. Mallissa on vähän pieniä sironta-arvoja, mikä viittaa muita malleja pienempään määrään minimikohtia. TH320pp:tä lukuunottamatta keskimääräinen sirontataso kaikilla malleilla on hyvin samanlainen ja sirontakuvion mediaani on likimain -10 dB. TH320pp:llä sirontataso on muita malleja alhaisempi pienemmästä soppikoosta ja siten pienemmästä poikkipinta-alasta johtuen. Merkittävimmät erot suhteessa TH320:een näkyvät kuvassa käyrän alussa ja lopussa. TH320pp:n käyrä nousee vähiten graafin lopussa, joten mallin sirontakuviossa ei ole selvää pääkeilaa. 9 GHz:n taajuudella käyrät eroavat hyvin vähän toisistaan. Tuloksista nähdään, että TH320pp:n keskimääräinen sirontataso on muita heikompi myös 9 GHz:n taajuudella.

Kun sironta-arvot normalisoidaan, kasvavat erot tutkaheijastimien välillä. Yksikerroksinen TH320pp toimii parhaiten, koska useampia soppeja on samanaikaisesti näkyvissä tiettyyn suuntaan. Tuloksista on havaittavissa, että soppikerroksien lisääminen (TH320ppk2 2 kerrosta ja TH2 3 kerrosta) heikentää normalisoitua sirontatasoa. Merkittäviä muutoksia sirontaominaisuuksissa eri heijastinmallien välillä ei ole havaittavissa 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla.

7.2 Halkaisija 45 cm (TH450, TH5, TH6, TH450h450, TH450s8 ja TH450s8k2)

Kuvassa 12 on esitetty ryhmän V tutkaheijastimien sironta-arvot painotettuna eri asentojen todennäköisyyksillä. Tulokset on esitetty 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla absoluuttisina ja normalisoituina vastaavan metallilevyn tutkapoikkipinnalla.



Kuva 12. Tutkaheijastimien eri asentojen todennäköisyydellä painotetut sirontakuviot ryhmän V tutkaheijastimille. Vasemmalla ovat tulokset 3 GHz:n ja oikealla 9 GHz:n taajuudella. Ylhäällä ovat absoluuttiset ja alhaalla normalisoidut tulokset.

Ryhmän V malleilla erot eri heijastinmallien välillä ovat suuremmat kuin ryhmän III malleilla. Sirontakäyrien mediaani vaihtelee -7 dB ja 0 dB välillä. Tulosten perusteella TH5:n sirontaominaisuudet ovat parhaimmat, vaikkakin sirontakuvioiden esiintyminen muilla malleilla suhteellisesti enemmän pieniä sironta-arvoja. TH450s8k2:lla on vähiten minimiarvoja ja sirontataso on TH5:n jälkeen toiseksi korkein molemmilla taajuuksilla. TH450s8:n ja TH450s8k2:n keskimääräinen sirontataso on korkeampi kuin referenssimallin TH450 molemmilla taajuuksilla. 9 GHz:n taajuudella selkeästi muita heikommin toimii TH450h450, jossa soppien muotoa on radikaalisesti muutettu paristoputken läpiviennin takia. Tulosten perustella TH450s8k2 toimii parhaiten, sillä sen keskimääräinen sirontataso on korkea ja sirontakuvioiden ei ole suuria tasovaihteluita.

Normalisoiduissa tuloksissa erot eri mallien välillä ovat samaa luokkaa kuin absoluuttisissa tuloksissa. TH450s8:lla on selvästi muita vähemmän minimiarvoja molemmilla taajuuksilla. 3-kerroksisen TH6:n sirontataso on muita malleja heikompi. 2-kerroksinen TH450s8k2 on parempi kuin 1-kerroksinen venytetty ja leikattu TH450h450. Normalisoitujen tulosten perusteella korkeimmat sironta-arvot antaa TH5, mutta tasaisimman ja keskimäärin korkeimman antaa TH450s8. Suhteessa referenssimalliin TH450 TH450s8:n käyrä on aina referenssimallin TH450 käyrän yläpuolella ja TH450s8k2:n käyrän alapuolella.

8 Tilastolliset tunnusluvut

Vertailun kannalta merkittävimmät tilastolliset suureet ovat keskiarvo, keskihajonta ja maksimi. Tilastollisten tunnuslukujen laskennasta on rajattu pois käytön kannalta vähemmän merkittävät suunnat tarkastelualueen rajauksella (pystykulmilla 40° - 140°) ja nopeat tasovaihtelut keskiarvoistuksella (3×3 liukuva keskiarvoistusmatriisi). Tutkaheijastimen eri asentojen vaikutus on huomioitu Bell-todennäköisyysfunktiolla.

8.1 Keskiarvo, keskihajonta ja maksimi

Taulukossa 6 esitetään tutkaheijastinkohtaiset keskiarvot, keskihajonnat ja maksimit 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa. Taulukossa ei esitetä minimiarvoja, koska niiden ilmoittaminen ei ole mielekästä käytettäessä normaalijakaumaa eri asentojen todennäköisyyksien painottamisessa. Tunnuksluvun laskennassa käytettävät sironta-arvot ovat painotettuja eikä niistä voida päätellä, onko kyse lähellä vaakatasoa olevista pienistä arvoista, joita on painotettu suurella painokertoimella vai kauempana vaakatasosta olevista suurista sironta-arvoista, joita on painotettu pienellä painokertoimella. Normalisoidut tunnusluvut esitetään liitteessä A.

Taulukossa punaisella värillä on esitetty ne tapaukset, missä referenssimalli on ollut paras, ja sinisellä värillä ne, missä merimerkeissä käytetty malli on ollut paras.

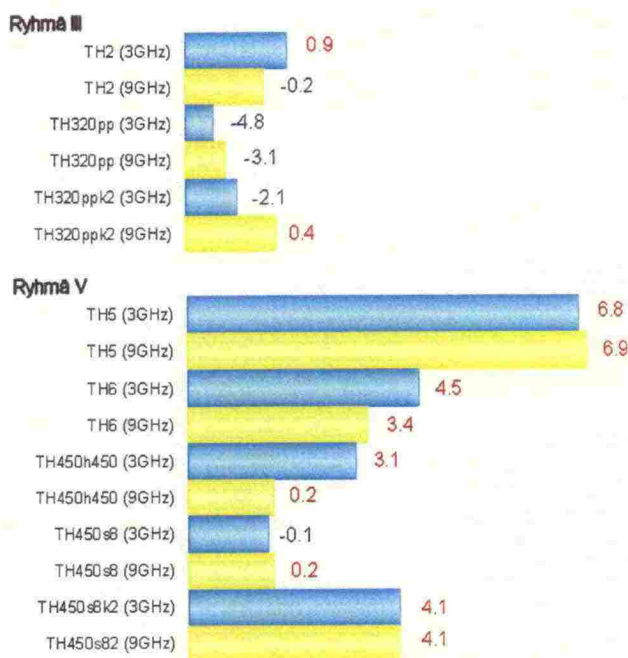
Taulukko 6. Tutkaheijastimien keskiarvot, keskihajonnat ja maksimit.

Ryhmä III	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
TH320	-4,8	1,3	-6,7	-0,5	0,4	6,0
TH2	-4,5	0,3	-6,7	-3,4	1,0	4,1
TH320pp	-9,2	-3,7	-12,6	-7,1	-5,9	1,4
TH320ppk2	-6,3	-0,4	-10,1	-3,1	-3,6	5,5
Ryhmä V	Keskiarvo		Keskihajonta		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
TH450	-4,0	3,4	-6,4	1,5	2,1	9,0
TH5	3,5	11,3	1,4	9,9	9,2	16,2
TH6	0,1	6,6	-2,5	3,9	6,4	11,6
TH450h450	-1,1	4,2	-2,9	3,3	5,7	10,1
TH450s8	-2,9	4,5	-5,6	1,7	1,6	8,4
TH450s8k2	0,1	7,5	-3,9	3,9	4,5	11,4

Ryhmän III tutkaheijastimista 3 GHz:n taajuudella TH2:lla on suurin keskiarvo ja maksimi. Vastaavasti 9 GHz:n taajuudella referenssimallilla TH320 on suurin keskiarvo ja maksimi. TH320pp:ssä ja TH320ppk2:ssa keskiarvot ovat selvästi alhaisempia johtuen siinä käytettyjen soppien pienemmästä koosta. TH320ppk2:n keskiarvo on kuitenkin noin 3 dB suurempi kuin TH320pp:n. TH320pp:llä on kaikista ryhmän III malleista pienin keskihajonta. Hajonta on pientä myös TH320ppk2:lla 3 GHz:n taajuudella.

Ryhmän V malleista TH5:llä on suurin keskiarvo ja maksimi molemmilla taajuuksilla. Se on kuitenkin ainoa malli ryhmässä, johon ei ole mallinnettu paristoputken läpivientä. Muiden mallien osalta TH450s8k2:n keskiarvo on 9 GHz:n taajuudella suurin. 3 GHz:n taajuudella TH450p8k2:lla on sama keskiarvo kuin TH6:lla ja 9 GHz:n taajuudella korkeampi. Keskihajonta 3 GHz:n taajuudella on TH450s8k2:lla hieman korkeampi kuin TH6:lla. 9 GHz:n taajuudella molemmilla malleilla keskihajonta on sama. TH450s8:n keskiarvot ja keskihajonnat ovat hieman suurempia kuin referenssimallilla TH450.

Laskentatapa, jolla tilastolliset tunnusluvut yhdistetään yhdeksi lukuarvoksi, on esitetty lähteessä [2]. Menetelmä suosii tutkaheijastinmalleja, joilla ympärisironta on suurin ja tasaisin, ja sakottaa niitä, joilla tasovaihtelut ovat suuria. Kuvassa 13 on esitetty lukuarvot 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla ryhmille III ja V. Kuvassa vihreä palkki kuvaa tuloksia 3 GHz:n taajuudella ja keltainen 9 GHz:n taajuudella. Luvut esitetään desibelimuodossa, jolloin negatiiviset arvot (kuvassa esitetty sinisellä) viittaavat siihen, että käytössä olevan tutkaheijastinmallin sirontaominaisuudet ovat heikommat kuin vastaavan referenssimallin ja positiiviset taas toisinpäin (kuvassa esitetty punaisella). Tunnusluvut lasketaan suhteessa ryhmän referenssimalliin, joten referenssimallien tunnuslukuja (arvoa nolla) ei ole esitetty kuvissa.

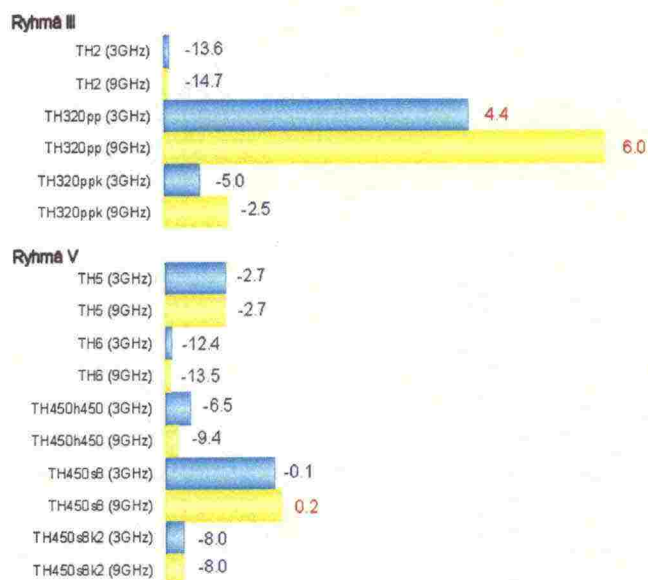


Kuva 13. Tutkaheijastinmallien yhdistetyt tunnusluvut ryhmien III ja V malleilla 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuudella.

Mallin TH320pp yhdistetty tunnuslukuarvo on negatiivinen molemmilla taajuuksilla, joten tunnuslukuarvo on suurempi referenssimallissa kuin TH320pp:llä. Syy alhaisempaan arvoon johtuu paristoputken läpiviennistä. 2-kerroksisen TH320ppk2:n yhdistetty tunnusluku on suurempi kuin 1-kerroksisen TH320pp:n. 3 GHz:n taajuudella TH2:n tunnusluku on suurempi kuin TH320ppk2:lla, mutta tilanne on päinvastainen 9 GHz:n taajuudella. 9 GHz:llä TH320ppk2 saa myös referenssimallia paremman tunnuslukuarvon.

Ryhmän V tutkaheijastimista TH5:n yhdistetyt tunnusluvut ovat suurimmat molemmilla taajuuksilla, koska siihen ei ole mallinnettu paristoputken läpivientä. Muiden mallien tuloksista nähdään, että TH450s8k2 on 3 GHz:n taajuudella hiukan heikompi kuin TH6, mutta 9 GHz:n taajuudella osat vaihtuvat. TH450s8:n tunnusluvut ovat ryhmässä pienimmät. Tämä johtuu mallin pienestä poikkipinta-alasta.

Kuvassa 14 esitetään normalisoidut yhdistetyt tunnusluvut, jotka saadaan, kun yhdistetyn tunnusluvun laskennassa käytetään pinta-alalla normalisoituja keskiarvoja ja maksimi-arvoja. Keskihajontaa ei normalisoida, koska se ei riipu koosta.



Kuva 14. Tutkaheijastinmallien normalisoidut yhdistetyt tunnusluvut 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla.

Normalisoiduista arvoista nähdään, että ryhmän III malleista TH320pp:lla on kokoonsa nähden selkeästi muita paremmat sirontaominaisuudet. Korkea tunnuslukuarvo johtuu osaksi myös siitä, että mallin sirontakuviossa keskihajonta on pieni. Normalisoituna TH2:n ja TH320ppk2:n yhdistetty tunnuslukuarvo on negatiivinen, joten niiden arvot ovat pienemmät kuin referenssimallilla.

Ryhmässä V TH450s8:n yhdistetty tunnusluku on samaa tasoa referenssimallin kanssa. Ryhmän muut mallit saavat näitä kahta mallia selvästi pienempiä tunnuslukuarvoja.

9 Soppikerrosten välinen etäisyys

Monitie-eteneminen aiheuttaa vaihtelua tutkaheijastimen vasteeseen. Vedenpinnasta tapahtuvan heijastuksen aiheuttamaa vastaanotetun signaalin kuoleutumista on pyritty pienentämään laskemalla referenssimalleille soppikerrosten välinen etäisyys niin, että monitie-etenemisen haittavaikutukset saataisiin minimoitua.

Monitie-etenemisestä aiheutuvien minimien ja maksimien paikoiksi saadaan (vedestä heijastuvan komponentin vaihe on 180°)

$$R_{\max} = 2 \frac{h_a h_s}{n \lambda} \quad \text{ja} \quad R_{\min} = 2 \frac{h_a h_s}{(n - 0.5) \lambda}, \quad (1)$$

missä R on etäisyys, h_a on tutka-antennin korkeus vedenpinnasta ja h_s sopen korkeus vedenpinnasta. Ongelmallisin minimi on ensimmäinen ($n=1$), koska R on silloin suurin. Minimien arvo on tällöin $(1-|\rho|)^4$ ja vastaavasti maksimien arvo on $(1+|\rho|)^4$.

Tutkayhtälön mukaisesti kohteeseen ja takaisin edennyt kenttä vaimenee kuten $1/R^4$. Tällä on vaikutusta minimien ja maksimien paikkoihin. Kentän etäisyysriippuvuuden vuoksi minimien ja maksimien paikkoja ei voida enää ratkaista analyyttisesti. Kuitenkin jos oletetaan vedenpinnan heijastuskertoimeksi $\rho = -1$, ensimmäisten minimien ja maksimien paikkoja voidaan approksimoida varsin tarkasti

$$R_{\max} = 2 \frac{h_a h_s}{n\lambda} \quad \text{ja} \quad R_{\min} \approx 3.1 \frac{h_a h_s}{\lambda}. \quad (2)$$

Taulukko 7. Ensimmäisten minimi- ja maksimikohtien paikat.

	$h_s = 3 \text{ m}$	$h_s = 3 \text{ m}$	$h_s = 5 \text{ m}$	$h_s = 5 \text{ m}$
	$f = 3 \text{ GHz}$	$f = 9 \text{ GHz}$	$f = 3 \text{ GHz}$	$f = 9 \text{ GHz}$
$R_{\min} (n=1)$	180 m	540 m	300 m	900 m
$R_{\max} (n=1)$	560 m	840 m	465 m	1395 m

Tutka-antennin korkeudeksi on määritelty $h_a = 3 \text{ m}$.

Kaukaisin minimi voidaan estää asettamalla toinen lähde siten, että sen aiheuttama maksimi osuu ensimmäisen lähteen minimin kohdalle. Lähteiden korkeudet ovat tällöin $h_{s2} \approx 0.65h_{s1}$. Mielenkiintoista ehdossa on, että korkeus ei riipu taajuudesta eikä tutka-antennin korkeudesta.

Useampien heijastimien käyttö aiheuttaa myös minimejä ja maksimeja viitan kallistellessa. Mitä korkeampi on heijastin, sitä nopeampaa on vasteen vaihtelu. Vasteen vaihtelunopeutta voidaan arvioida ryhmäteorian avulla, jolloin minimien tai maksimien väliksi saadaan

$$\Delta\theta = \text{Arc sin} \left| \frac{\lambda}{2(h_{s1} - h_{s2})} \right|. \quad (3)$$

Tehtyjen simulointien perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että lähellä toisiaan olevat heijastimet aiheuttavat suurempaa vaihtelua kuin kauempana olevat. Hyvä valinta kahdelle erilliselle heijastimelle näyttäisi olevan $h_{s2} \approx 0.65h_{s1}$.

Liitteessä B on esitetty laskentatulokset kahden pistelähteen tutkavasteesta.

10 Yhteenveto

Tämä tutkimus oli jatkoa lähteessä [2] kuvatulle tutkaheijastimien analysoinnille. Tutkimuksessa tarkasteltiin paristoputken läpiviennin ja toisen soppikerroksen lisäyksen vaikutusta referenssimalleihin TH320 ja TH450. Tehtävään kuului myös laskea 2-kerroksisten mallien tapauksessa soppikerrosten välinen etäisyys niin, että vedenpinnan kautta tapahtuvan heijastuksen aiheuttamaa signaalin kuoleutumista saataisiin pienennettyä.

Analysointia varten toteutettiin ryhmään III kaksi uutta heijastinmallia: TH320pp ja TH320ppk2. Molempiin malleihin oli mallinnettu paristoputken läpivienti. TH320ppk2 koostui kahdesta TH320pp-mallista, jotka oli asetettu päällekkäin. Uusien mallien sirontaominaisuuksia verrattiin edellisen tutkimusraportin tuloksiin. Paristoputken läpiviennin seurauksena käytetty soppikoko pieneni ja malleissa jouduttiin käyttämään kuuden sopen sijasta kahtatoista pienempää soppea. Soppikoon pienentyessä tutkaheijastimen korkeus pieneni, jolloin heijastimen kokonaispinta-ala ja keskimääräinen sirontataso pieneni. Kahdellatoista sopella saavutettiin kuitenkin pienempi keskihajonta, mikä merkittävästi kasvatti yhdistettyä tunnuslukuarvoa. 2-kerroksinen rakenne aiheutti sirontakuvion liuskoittumista, mutta keskimääräinen sirontataso säilyi korkeampana kuin TH320pp:ssa. Tämä johtui suuremmasta poikkipinta-alasta. Kokoonsa nähden yksikerrokset mallit kuitenkin antavat paremman keskimääräisen sirontatason kuin monikerrokset mallit.

Analysointia varten toteutettiin myös ryhmään V kaksi uutta heijastinmallia. TH450s8 oli rakenteeltaan samanlainen kuin referenssimalli TH450, mutta siitä poistettiin TH450:ssä esiintyvät aukot soppien välissä lisäämällä malliin kaksi uutta soppea. Odotetusti sirontaominaisuudet paranivat muutoksen tuloksena. Malli TH450s8k2 koostui kahdesta päällekkäin asetetusta TH450s8-tutkaheijastinmallista. Kuten TH320ppk2 tapauksessa TH450ppk2:sen sirontakuvioon syntyi liuskoittumista, mutta keskimääräinen sirontataso kasvoi yksikerroksiseen malliin verrattuna.

Tutkimuksen viimeisenä tehtävänä oli määritellä sopiva soppikerroksien välinen etäisyys ryhmien III ja V kaksikerroksisille malleille niin, että vedenpinnan kautta tapahtuvan monitie-etenemisen aiheuttamaa signaalin kuoleutumista voitaisiin pienentää. Laskenta suoritettiin 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla olettaen heijastimet pistelähteiksi. Laskelmien perusteella näyttäisi siltä, että optimaaliset ylemmän ja alemman heijastimen korkeudet saadaan ehdosta $h_{s2} \approx 0.65h_{s1}$.

Lähdeluettelo

- [1] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Toivanen, H., Horsmanheimo, S., Tutkaheijastimien analysointi, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 3.9. 2004, 39 s.
- [2] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Toivanen, H., Horsmanheimo, S., Tutkaheijastinprototyypin laskenta, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 20.4. 2005, 61 s.

Liite A: Normalisoidut tunnusluvut

Tutkaheijastimen koko vaikuttaa eniten tutkapoikkipinta-alaan. Soppien koon, muodon ja suuntauksen vaikutuksia on tutkittu normalisoimalla tutkaheijastinmallien tutkapoikkipinta-alat vastaavan metallilevyn tutkapoikkipinta-alalla. Koska keskihajonta ei riipu poikkipinta-alasta samalla tavalla kuin keskiarvo ja maksimi, on se jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Normalisoiduista sironta-arvoista lasketut tutkaheijastinkohtaiset tilastolliset tunnusluvut esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Normalisoidut tilastolliset tunnusluvut.

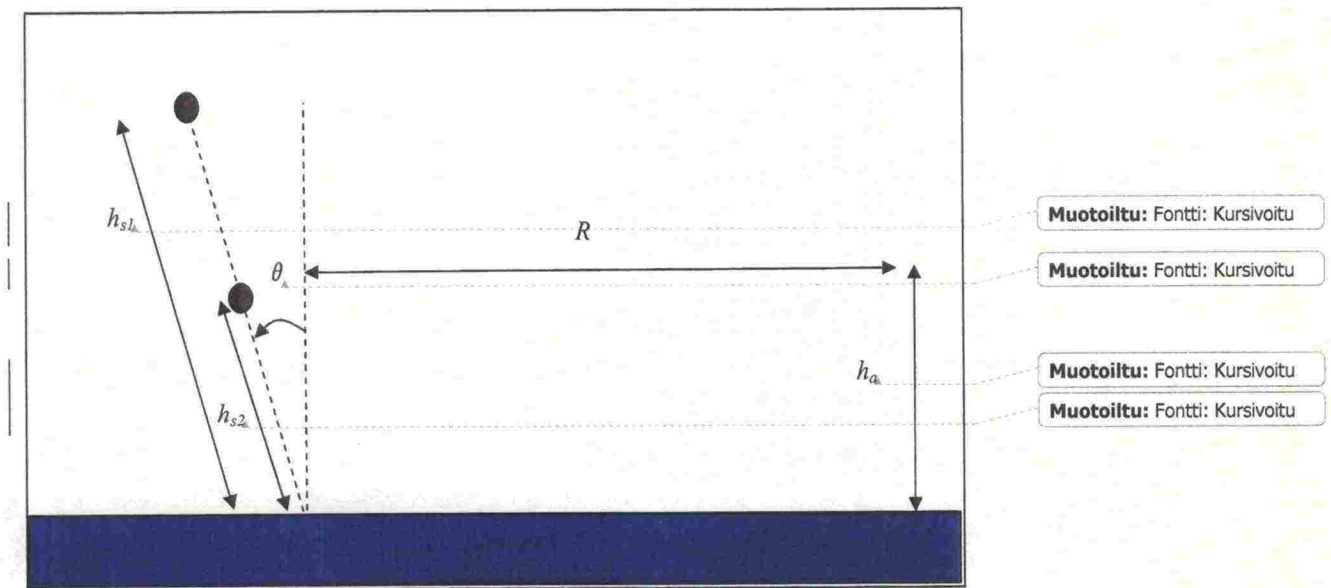
Ryhmä III	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
TH320	-13,2	-16,5	-7,9	-11,9
TH2	-20,1	-24,8	-14,6	-21,1
TH320pp	-13,0	-17,0	-9,6	-12,0
TH320ppk2	-16,1	-19,7	-13,4	-13,8
Ryhmä V	Keskiarvo		Maksimi	
	3 GHz	9 GHz	3 GHz	9 GHz
TH450	-16,4	-18,5	-10,2	-12,9
TH5	-13,7	-15,3	-7,9	-10,4
TH6	-20,7	-23,8	-14,5	-18,8
TH450h450	-18,2	-22,4	-11,4	-16,6
TH450s8	-15,3	-17,5	-10,7	-13,5
TH450s8k2	-18,3	-20,4	-13,9	-16,5

Taulukosta nähdään, että kokoonsa nähden tutkaheijastinmalli TH320pp toimii 3 GHz:n taajuudella hieman paremmin kuin TH320 ja 9 GHz:n taajuudella melkein yhtä hyvin kun tarkastellaan keskiarvoja. Myös maksimin suhteen nämä mallit toimivat paremmin kuin muut ryhmän III mallit. TH320pp toimii hyvin vaikka sen sopet ovat paristoputken läpiviennin takia huomattavasti pienemmät kuin TH320:n sopet, mutta TH320pp:llä on kaksitoista soppea TH320:n kuuden sijasta.

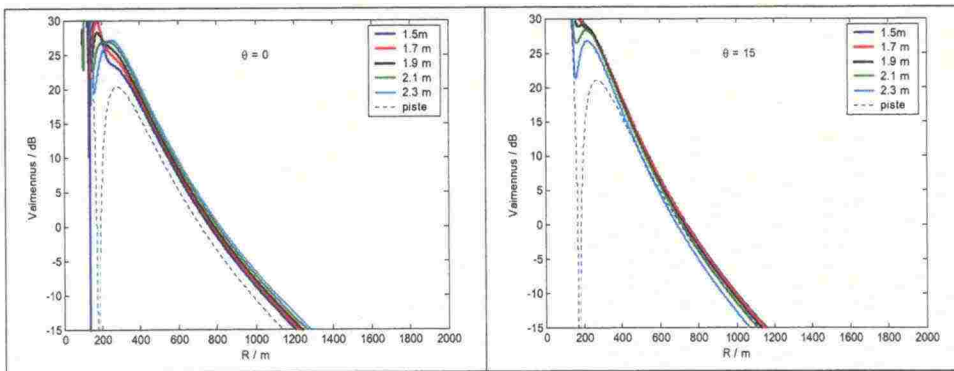
TH5:lla on kokoonsa verrattuna korkeimmat keskiarvot ja maksimit johtuen siitä, ettei siinä ole paristoputken läpivientä. Muista malleista TH450s8:lla on korkein keskiarvo molemmilla taajuuksilla ja TH450:llä korkeimmat maksimit.

Liite B: Kahden pistelähteen laskettu tutkavaste

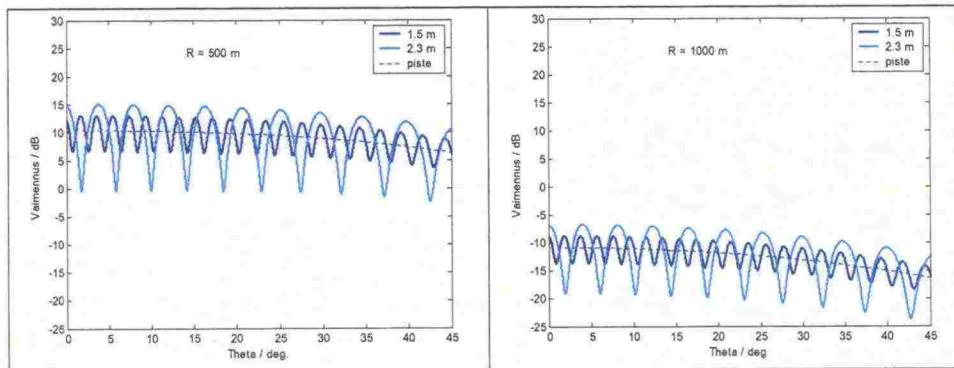
Sekä teorian mukaan että käytännön kokemuksella tiedetään, että monikerroksinen rakenne aiheuttaa sirontakuvioissa liuskoittumista. Takaisinsironnan maksimiarvo voi kasvaa, mutta tehotason vaihteluja esiintyy yksikerroksista rakennetta enemmän. Liitteen kuvissa näytetään millaisen vaimennuksen kaksi pistemäistä lähdettä aiheuttavat eri etäisyyksillä ja eri kallistuskulmilla kun niiden keskinäinen etäisyys vaihtuu. Tilanne kuvataan kuvassa 15. Korkeuden h_{s2} arvo on joko 3 tai 5 m, mutta h_{s1} vaihtuu laskennoissa. Tutka-antennin korkeus h_a on aina 3 m. Tulokset näytetään etäisyyden R tai kallistuskulman θ funktiona. Vedenpinnan heijastuskertoimeksi oletetaan $\rho = -1$ ja laskennoissa käytetään vaakapolarisaatiota. Tutkavasteeseen on oletettu $1/R^4$ riippuvuus.



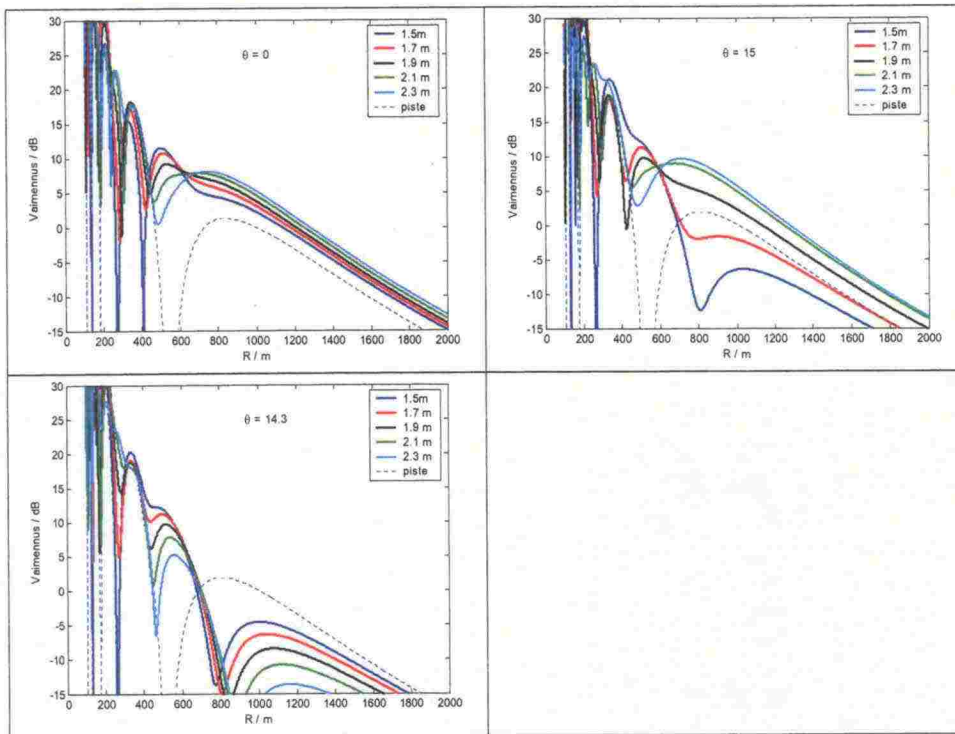
Kuva 15. Laskennoissa käytetyt parametrit.



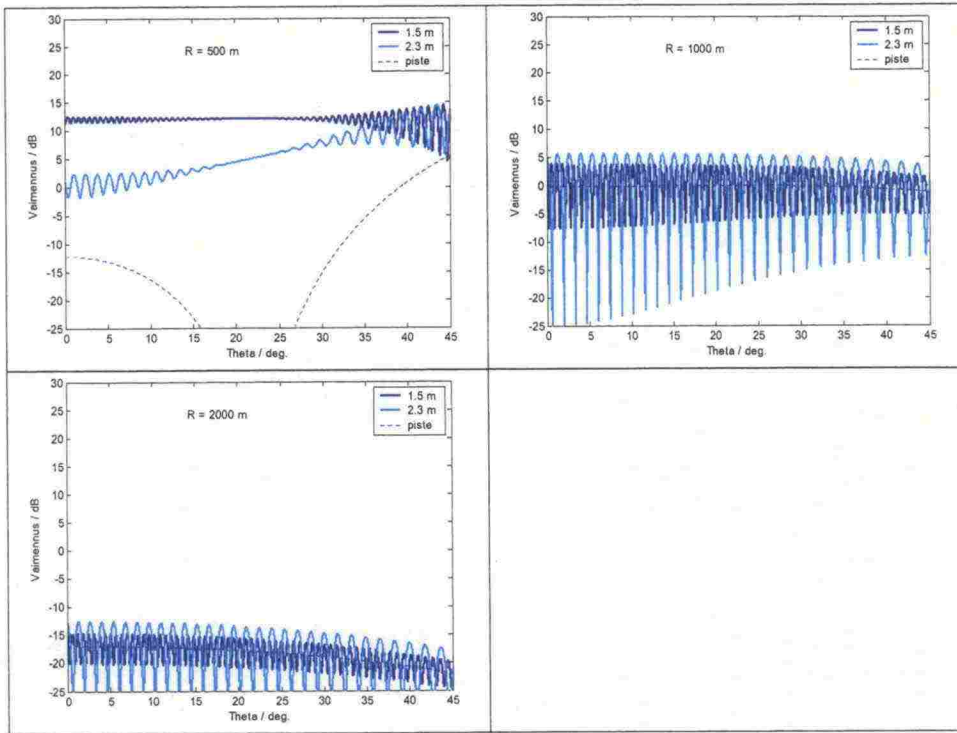
Kuva 16. Kahden pistelähteen vaste etäisyyden funktiona parametreilla $h_{s2} = [1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3 \text{ m}]$ ja $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Viimeinen korkeus on kuvassa merkitty piste-sanalla, koska silloin tutkitaan vain toista pistettä, jonka korkeus on $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Vasemmassa kuvassa $\theta = 0^\circ$ ja oikeassa kuvassa $\theta = 15^\circ$. Taajuus $f = 3 \text{ GHz}$.



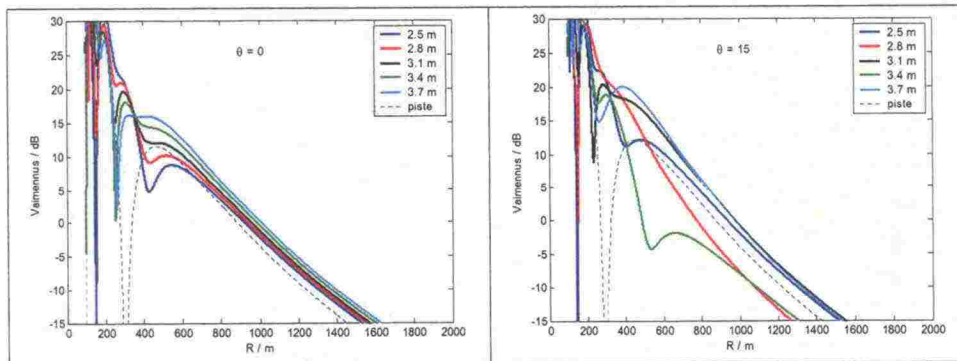
Kuva 17. Kahden pistelähteen vaste kallistuskulman θ funktiona parametreilla $h_{s2} = [1.5, 2.3 \text{ m}]$ ja $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Viimeinen korkeus on kuvassa merkitty piste-sanalla, koska silloin tutkitaan vain toista pistettä, jonka korkeus on $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Vasemmassa kuvassa $R = 500 \text{ m}$ ja oikeassa kuvassa $R = 1000 \text{ m}$. Taajuus $f = 3 \text{ GHz}$.



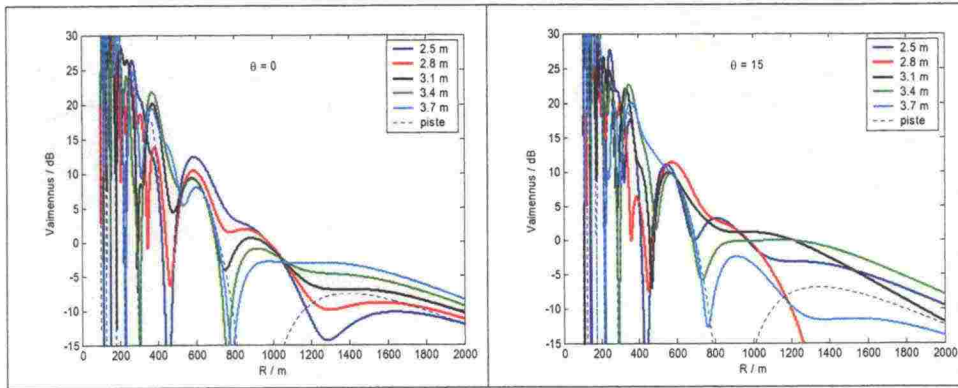
Kuva 18. Kahden pistelähteen vaste etäisyyden funktiona parametreilla $h_{s2} = [1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3 \text{ m}]$ ja $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Viimeinen korkeus on kuvassa merkitty piste-sanalla, koska silloin tutkitaan vain toista pistettä, jonka korkeus on $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Ylemmässä vasemmassa kuvassa $\theta = 0^\circ$, ylemmässä oikeassa kuvassa $\theta = 15^\circ$ ja alemmassa kuvassa $\theta = 14.3^\circ$.
Taaajuus $f = 9 \text{ GHz}$.



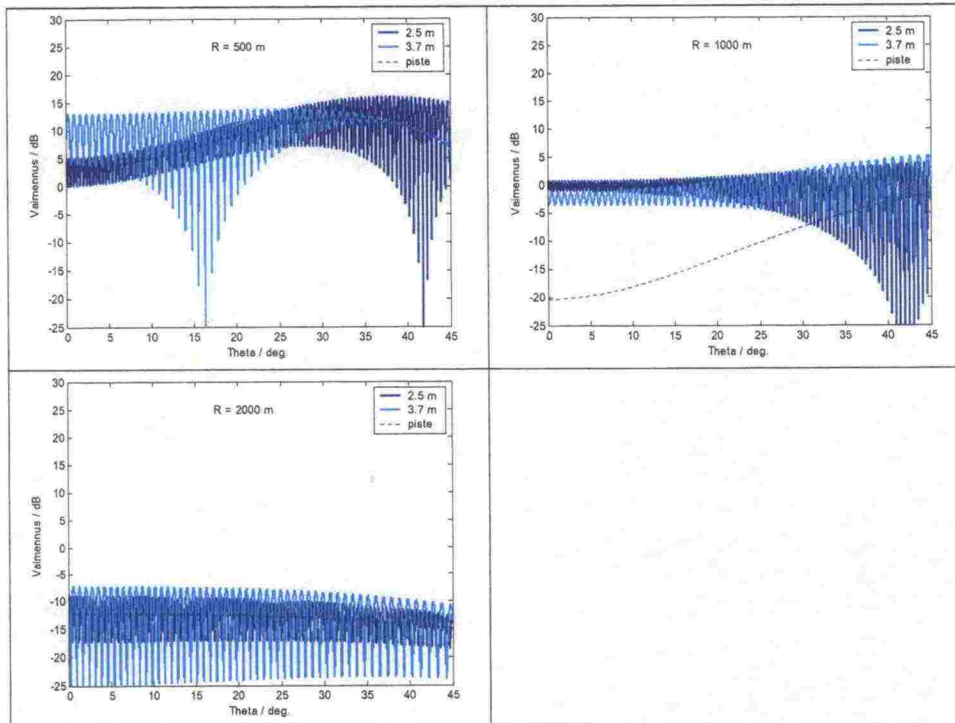
Kuva 19. Kahden pistelähteen vaste kallistuskulman θ funktiona parametreilla $h_{s2} = [1.5, 2.3 \text{ m}]$ ja $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Viimeinen korkeus on kuvassa merkitty piste-sanalla, koska silloin tutkitaan vain toista pistettä, jonka korkeus on $h_{s1} = 3 \text{ m}$. Ylempässä vasemmassa kuvassa $R = 500 \text{ m}$, ylempässä oikeassa kuvassa $R = 1000 \text{ m}$ ja alemmassa kuvassa $R = 2000 \text{ m}$. Taajuus $f = 9 \text{ GHz}$.



Kuva 20. Kahden pistelähteen vaste etäisyyden funktiona parametreilla $h_{s2} = [2.5, 2.8, 3.1, 3.4, 3.7 \text{ m}]$ ja $h_{s1} = 5 \text{ m}$. Viimeinen korkeus on kuvassa merkitty piste-sanalla, koska silloin tutkitaan vain toista pistettä, jonka korkeus on $h_{s1} = 5 \text{ m}$. Vasemmassa kuvassa $\theta = 0^\circ$ ja oikeassa kuvassa $\theta = 15^\circ$. Taajuus $f = 3 \text{ GHz}$.



Kuva 21. Kahden pistelähteen vaste etäisyyden funktiona parametreilla $h_{s2} = [2.5, 2.8, 3.1, 3.4, 3.7 \text{ m}]$ ja $h_{s1} = 5 \text{ m}$. Viimeinen korkeus on kuvassa merkitty piste-sanalla, koska silloin tutkitaan vain toista pistettä, jonka korkeus on $h_{s1} = 5 \text{ m}$. Vasemmassa kuvassa $\theta = 0^\circ$ ja oikeassa kuvassa $\theta = 15^\circ$. Taajuus $f = 9 \text{ GHz}$.



Kuva 22. Kahden pistelähteen vaste kallistuskulman θ funktiona parametreilla $h_{s2} = [2.5, 3.7 \text{ m}]$ ja $h_{s1} = 5 \text{ m}$. Viimeinen korkeus on kuvassa merkitty piste-sanalla, koska silloin tutkitaan vain toista pistettä, jonka korkeus on $h_{s1} = 5 \text{ m}$. Ylemmässä vasemmassa kuvassa $R = 500 \text{ m}$, ylemmässä oikeassa kuvassa $R = 1000 \text{ m}$ ja alemmassa kuvassa $R = 2000 \text{ m}$. Taajuus $f = 9 \text{ GHz}$.